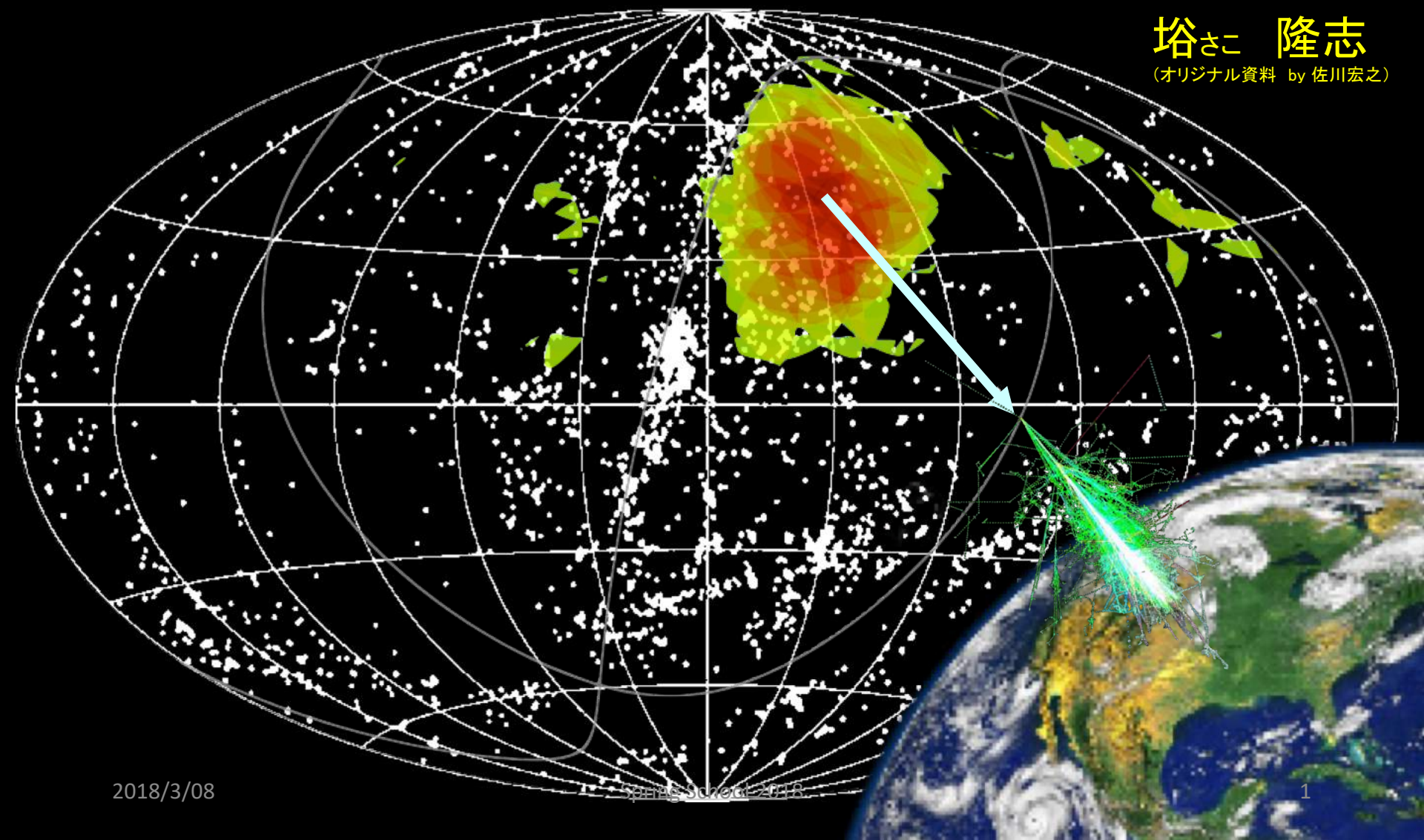


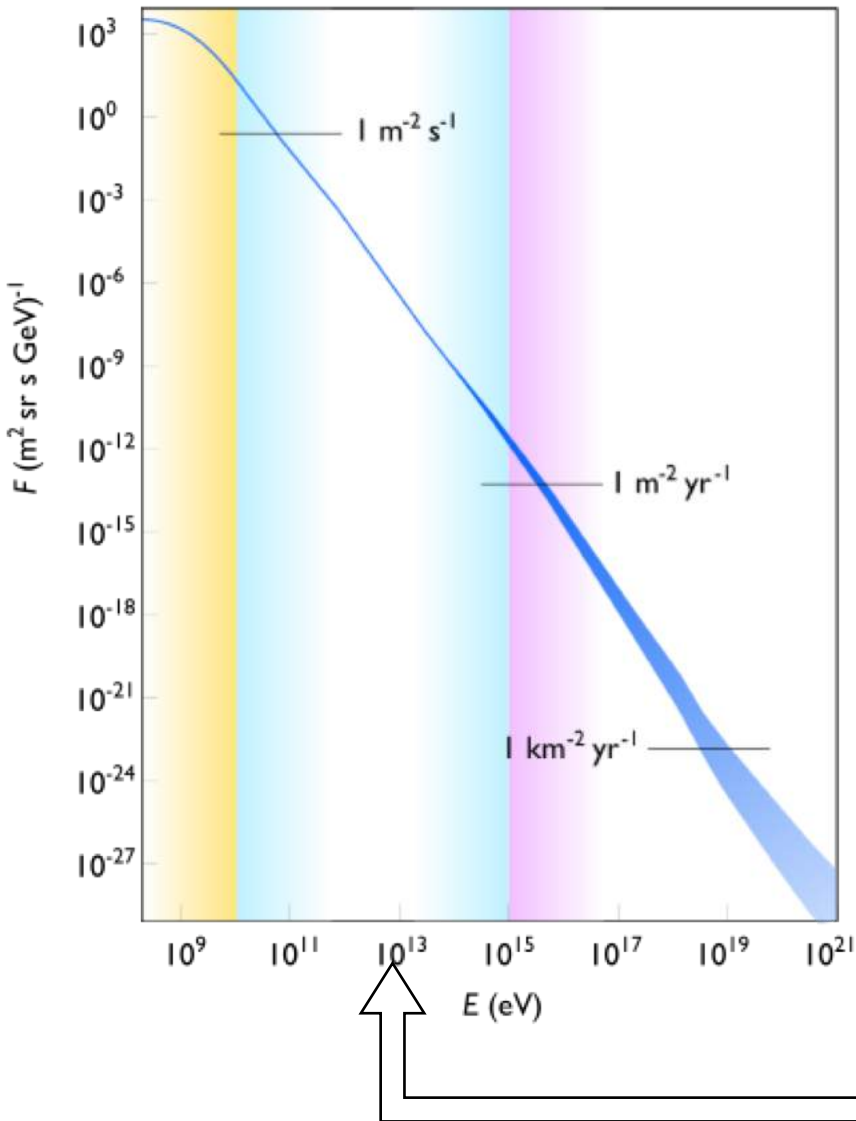
最高エネルギー宇宙線

塔さこ 隆志

(オリジナル資料 by 佐川宏之)



1ページで学ぶ「宇宙線とは？」



横軸の単位はeV (エレクトロンボルト)
 1eV = 電子を1Vで加速した場合のエネルギー
 = 1.6×10^{-19} J (ジュール)

[狭義]宇宙から降り注ぐ高エネルギー放射線

- 陽子、ヘリウム原子核、各種原子核

[広義]

- 電子、陽電子、ガンマ線、ニュートリノ
- ダークマター、重力波

マルチメッセンジャー天文学

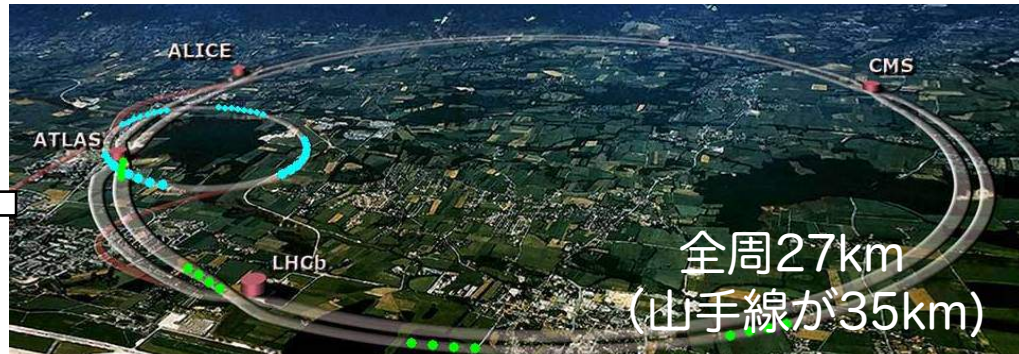
様々なエネルギーの宇宙線がやって来る

- 大体 1秒間に指先(1cm²)を1回貫通 [注：大気の外]
- エネルギーが一桁増えると、頻度は約 1/1000
- 10^{20} eVの宇宙線が来ている(100km²に年に一個)
- 人口加速器の最高エネルギーは 7×10^{12} eV

宇宙加速器はどこにある？

- 謎??
- 宇宙の極限天体・現象に関わるはず

世界最大の粒子加速器 LHC
 (CERN, スイス, フランス国境)



全周27km
 (山手線が35km)

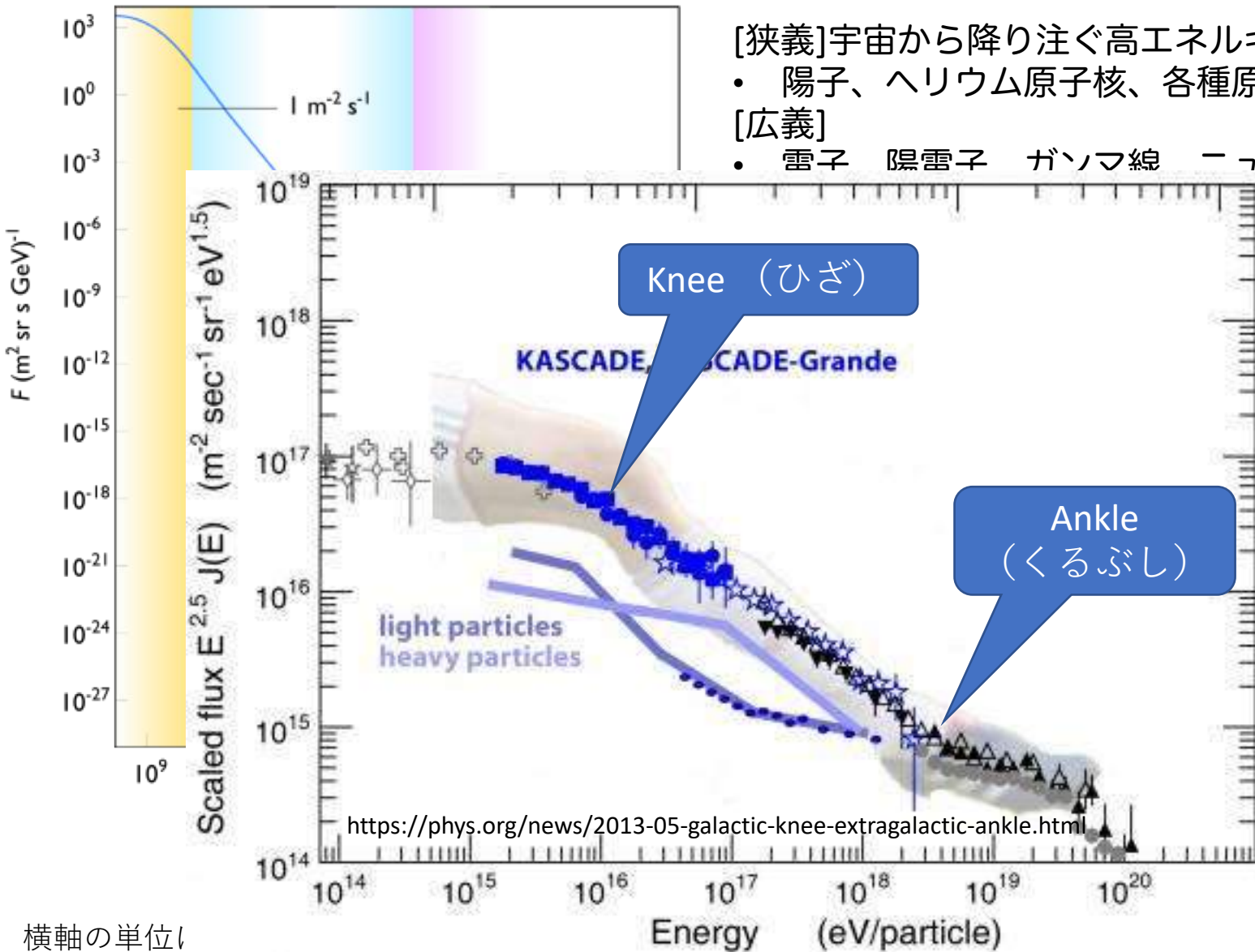
1ページで学ぶ「宇宙線とは？」

[狭義]宇宙から降り注ぐ高エネルギー放射線

- 陽子、ヘリウム原子核、各種原子核

[広義]

- 電子 陽電子 ガンマ線 ニュートリノ



とくる
 [注：大気の外]
 約 1/1000
 10^{12} に年に一個)
 $10^{12} eV$

JHC
 国境)



横軸の単位は
 1eV = 電子を1Vで加速した場合のエネルギー
 = 1.6×10^{-19} J (ジュール)

<https://phys.org/news/2013-05-galactic-knee-extragalactic-ankle.html>

粒子を加速するには

電場 (V [Volt])



+

陽子 (電荷 e [C])

$E=eV$ [eV]に加速

粒子を加速するには

電場 (V [Volt])



天体（加速器）から脱出



陽子 (電荷 e [C])

$E=eV$ [eV]に加速

粒子を加速するには

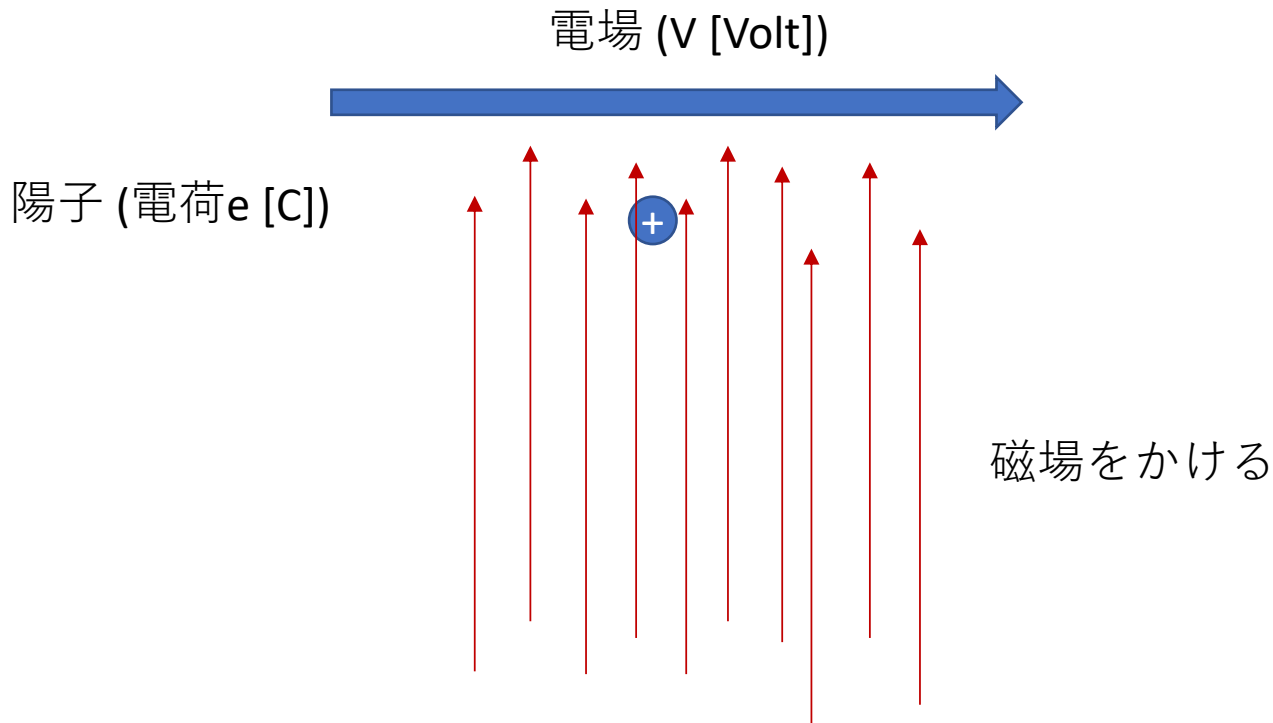
電場 (V [Volt])



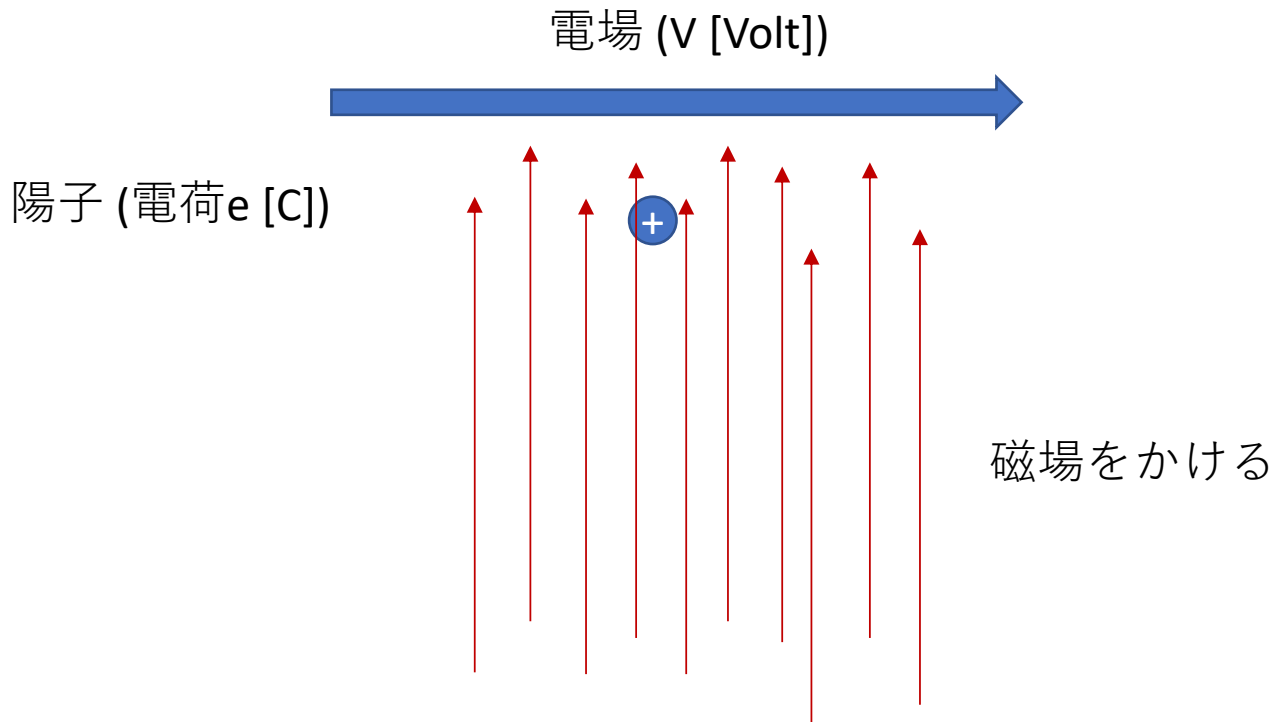
陽子 (電荷 e [C])

$E=eV$ [eV]に加速

粒子を加速するには



粒子を加速するには

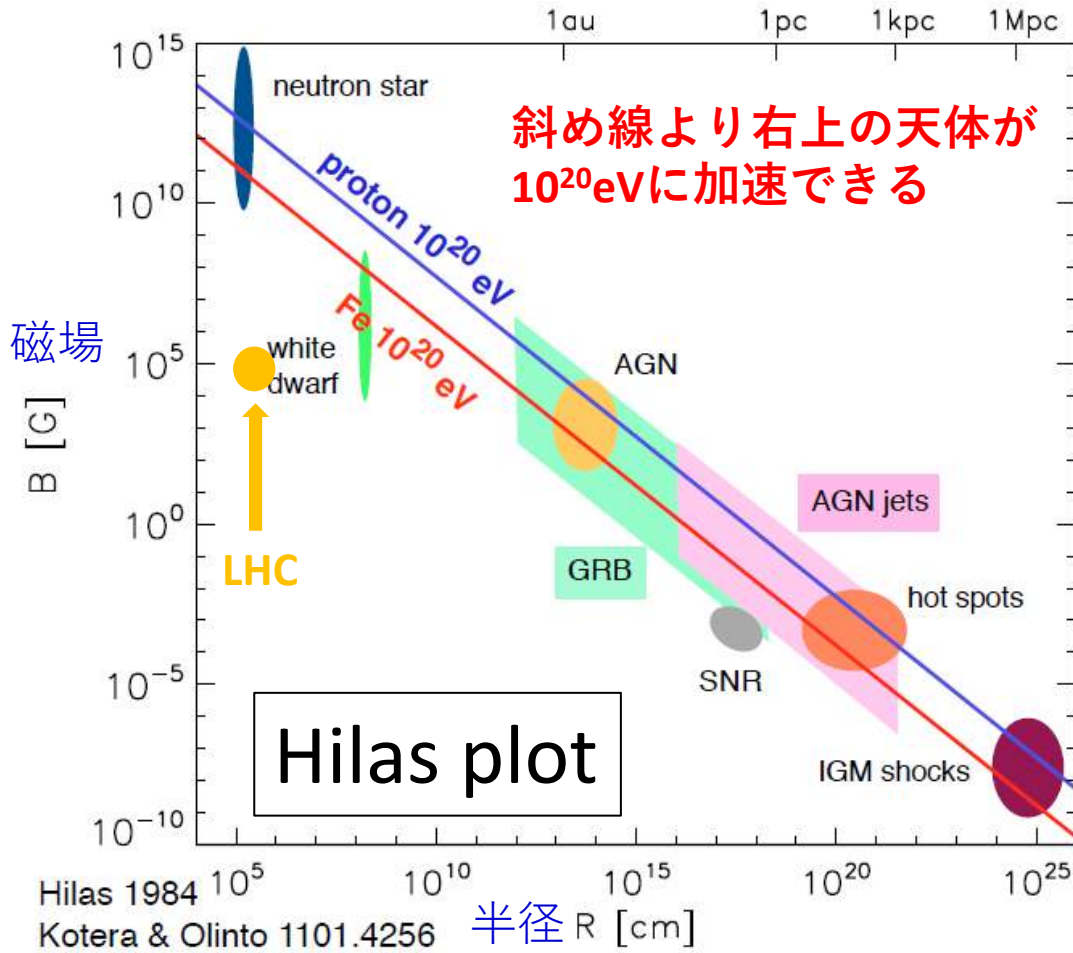


天体（加速器）で加速できる（正確には「閉じ込められる」）

最大エネルギーは $E_{max} \propto BR$ (B:磁場強度、R:サイズ)

最高エネルギー宇宙線の発生源候補

$$E_{max} \propto BR$$



宇宙最大BH
 $M_{BH} \sim 10^{6-9} M_{sun}$

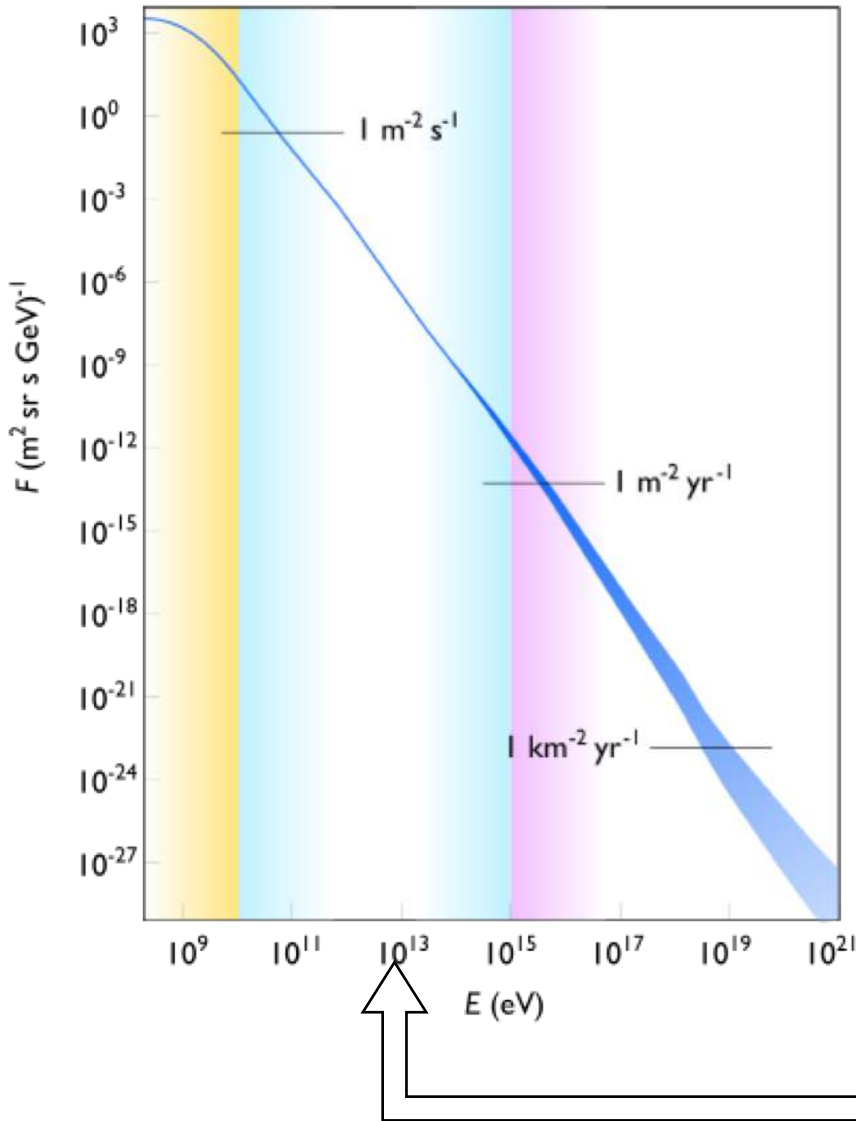
宇宙最強爆発
 $E_{GRB} \sim 10^{51} \text{ergs}$

宇宙最強磁場
 $B \sim 10^{15} \text{G}$

宇宙最大重力束縛天体
 $r_{vir} \sim \text{a few Mpc}$

既知天体の限界は 10^{20}eV ? => どの天体? $>10^{20} \text{eV}$ の未知現象は?

1ページで学ぶ「宇宙線とは？」



横軸の単位はeV (エレクトロンボルト)
1eV = 電子を1Vで加速した場合のエネルギー
= 1.6×10^{-19} J (ジュール)

[狭義]宇宙から降り注ぐ高エネルギー放射線

- 陽子、ヘリウム原子核、各種原子核

[広義]

- 電子、陽電子、ガンマ線、ニュートリノ
- ダークマター、重力波

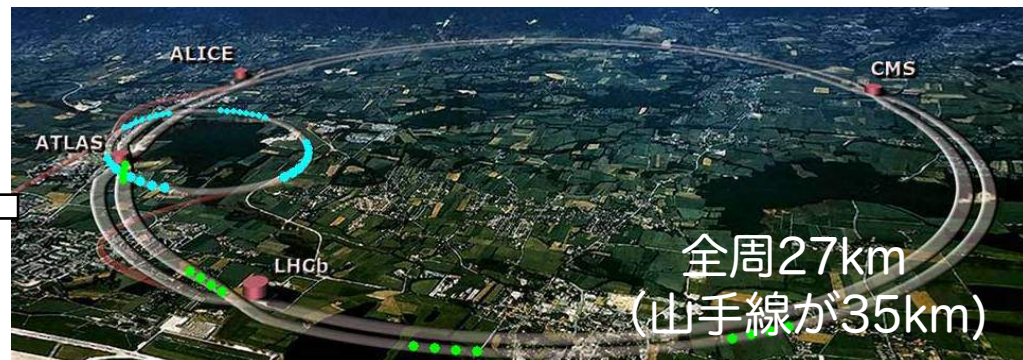
様々なエネルギーの宇宙線がやってくる

- 大体 1秒間に指先(1cm²)を1回貫通 [注：大気の外]
- エネルギーが一桁増えると、頻度は約 1/1000
- 10²⁰eVの宇宙線が来ている(100km²に年に一個)
- 人口加速器の最高エネルギーは 7×10^{12} eV

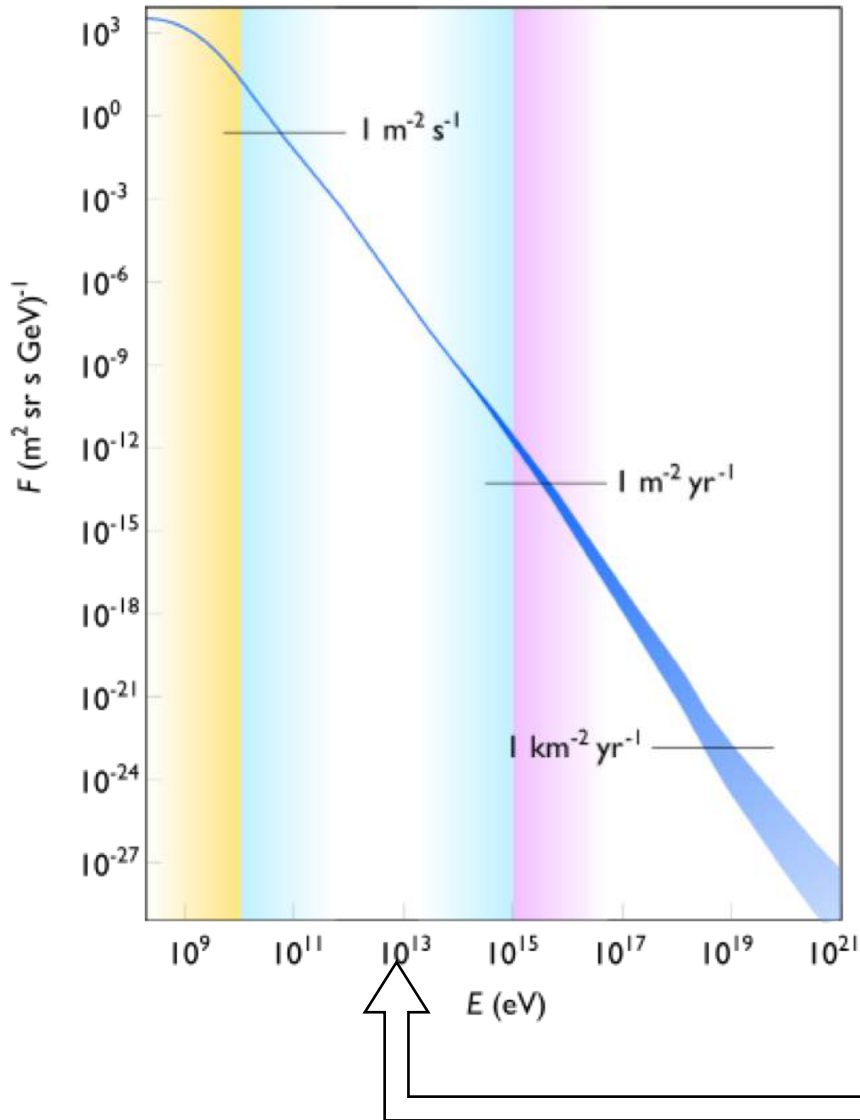
宇宙線はどこから来るのか？

- 謎??
- 宇宙の極限天体・現象に関わるはず

世界最大の粒子加速器 LHC
(CERN, スイス, フランス国境)



1ページで学ぶ「宇宙線とは？」



横軸の単位はeV (エレクトロンボルト)
1eV = 電子を1Vで加速した場合のエネルギー
= 1.6×10^{-19} J (ジュール)

[狭義]宇宙から降り注ぐ高エネルギー放射線

- 陽子、ヘリウム原子核、各種原子核

[広義]

- 電子、陽電子、ガンマ線、ニュートリノ
- ダークマター、重力波

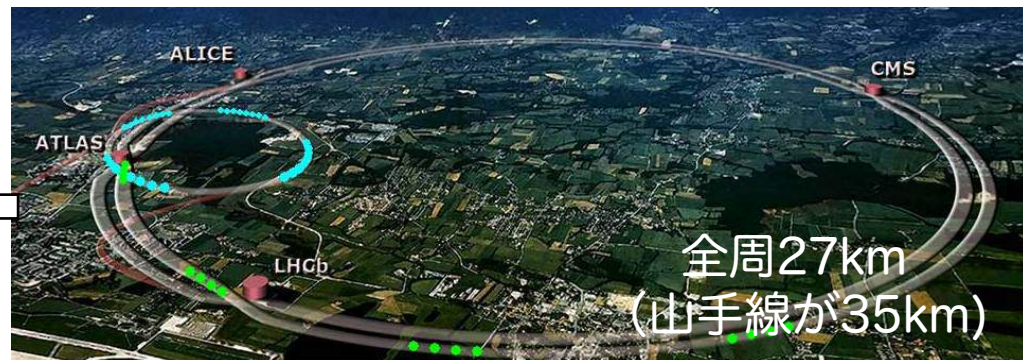
様々なエネルギーの宇宙線がやってくる

- 大体 1秒間に指先(1cm²)を1回貫通 [注：大気の外]
- エネルギーが一桁増えると、頻度は約 1/1000
- 10²⁰eVの宇宙線が来ている(100km²に年に一個)
- 人口加速器の最高エネルギーは 7×10^{12} eV

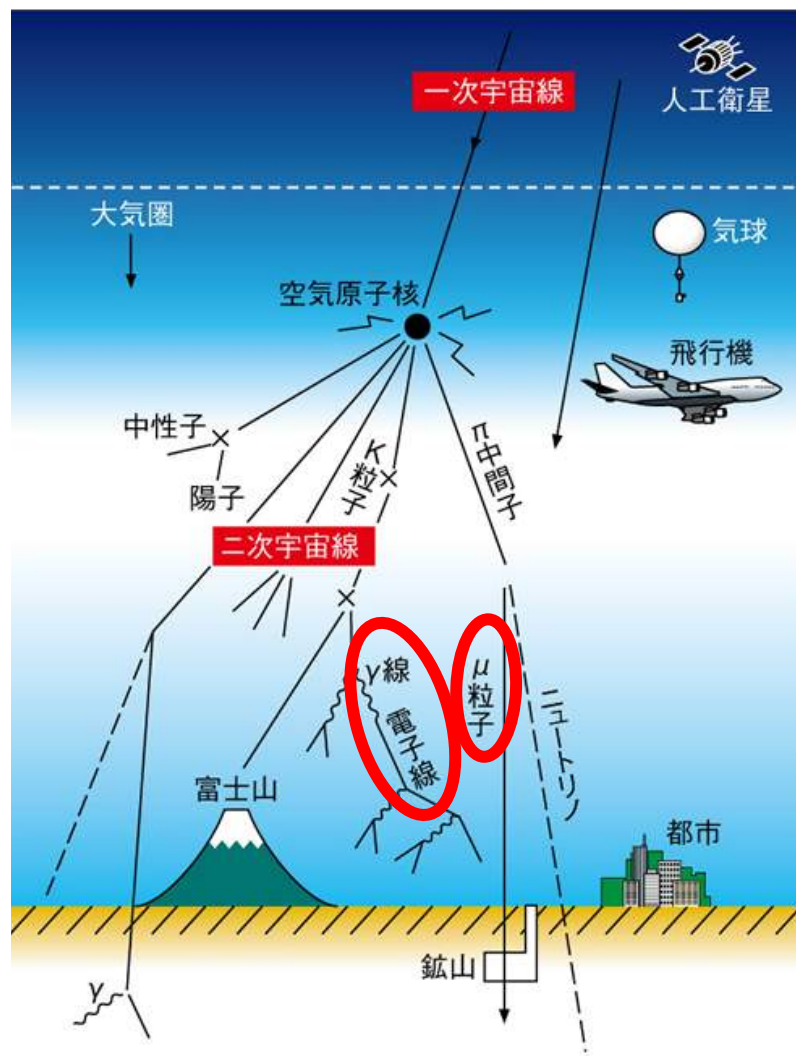
宇宙線はどこから来るのか？

- 謎??
- 宇宙の極限天体・現象に関わるはず

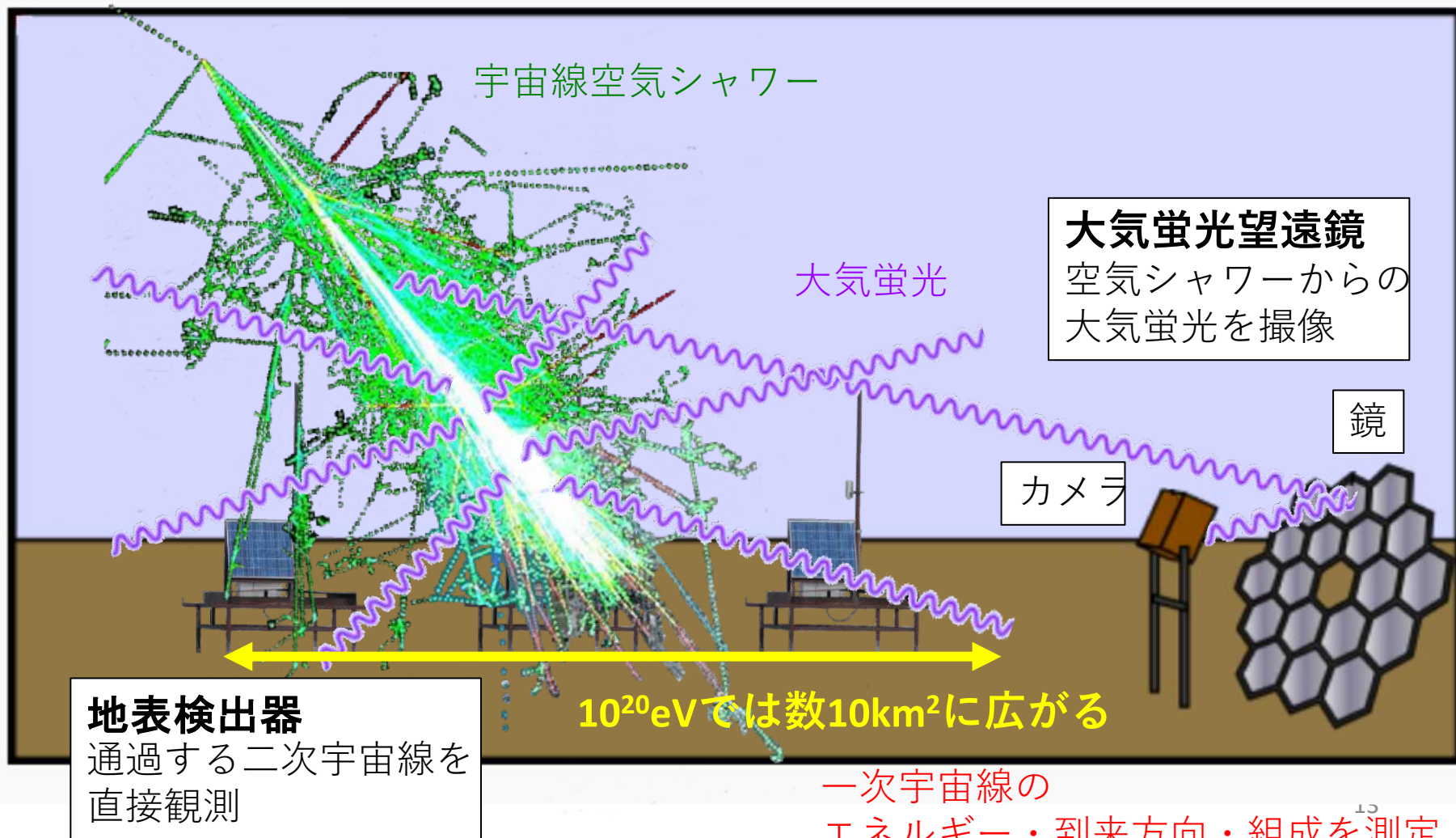
世界最大の粒子加速器 LHC
(CERN, スイス, フランス国境)



超高エネルギー宇宙線と空気シャワー



地表検出器と大気蛍光望遠鏡



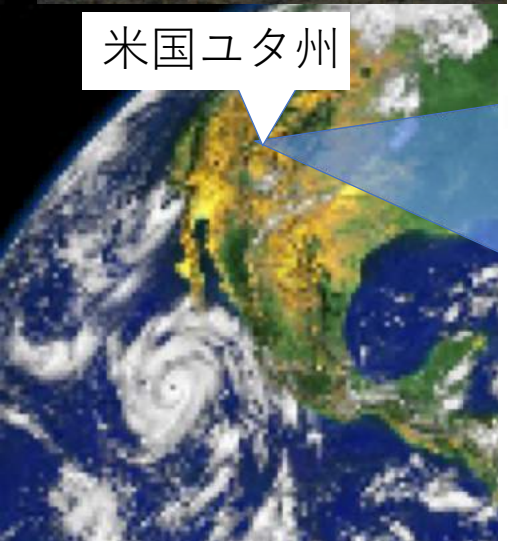


テレスコープアレイ(TA)



大気蛍光望遠鏡

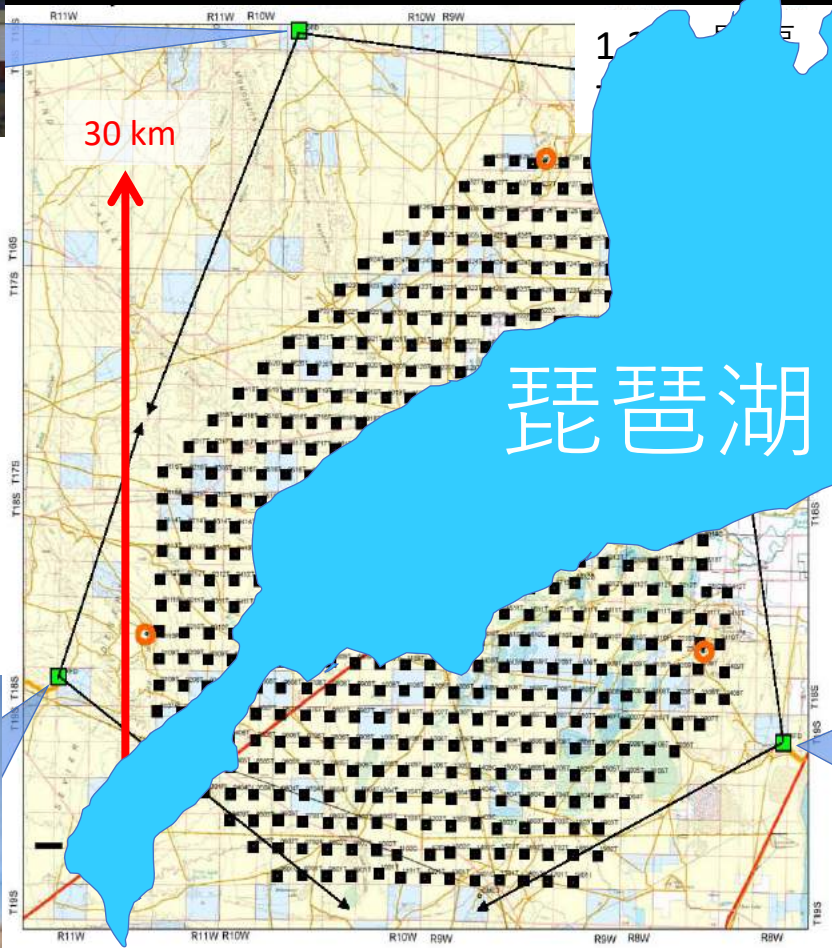
米国ユタ州



大気蛍光望遠鏡

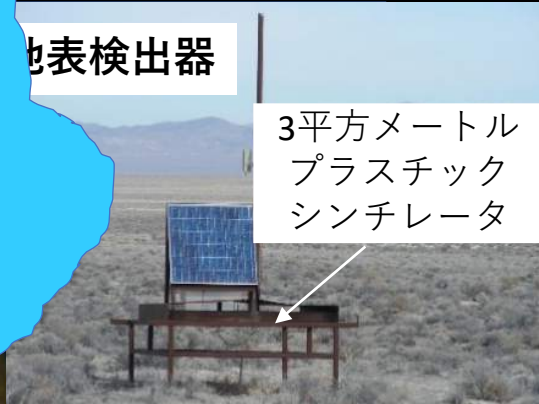


標高1400 m



琵琶湖

2008年5月より
ハイブリッド観測開始



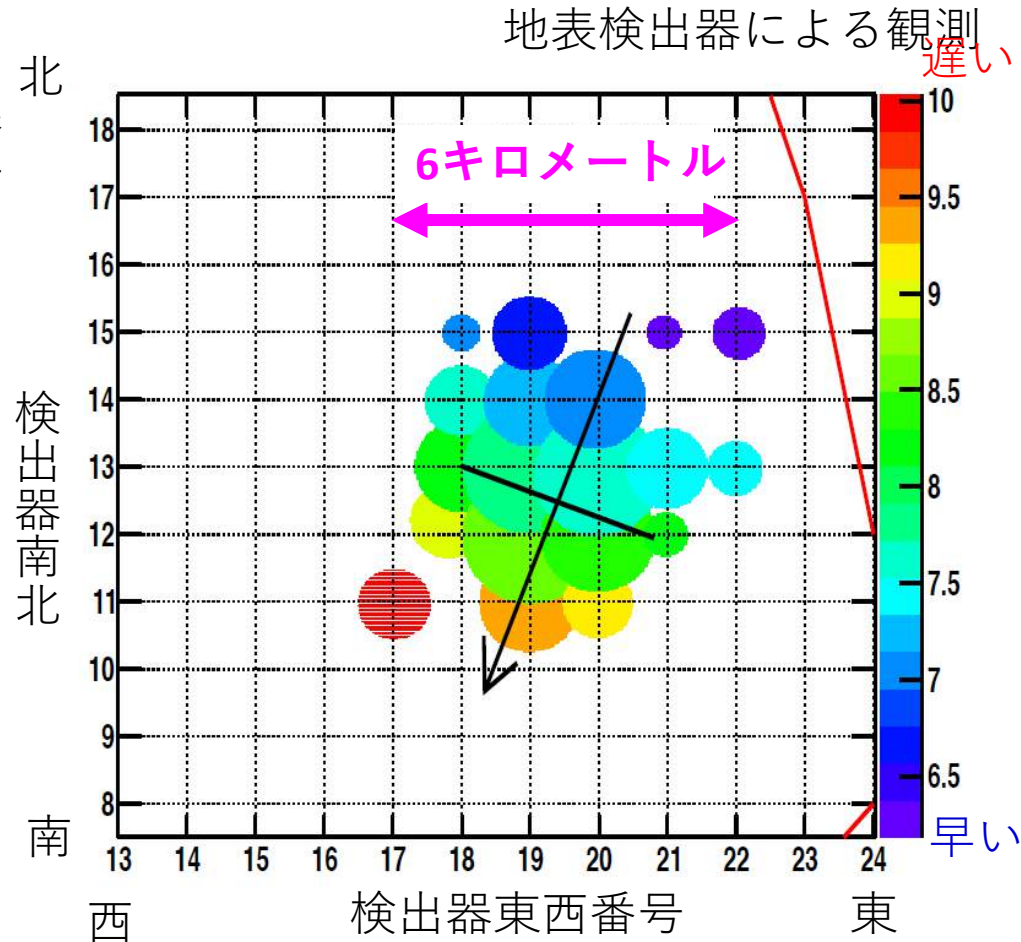
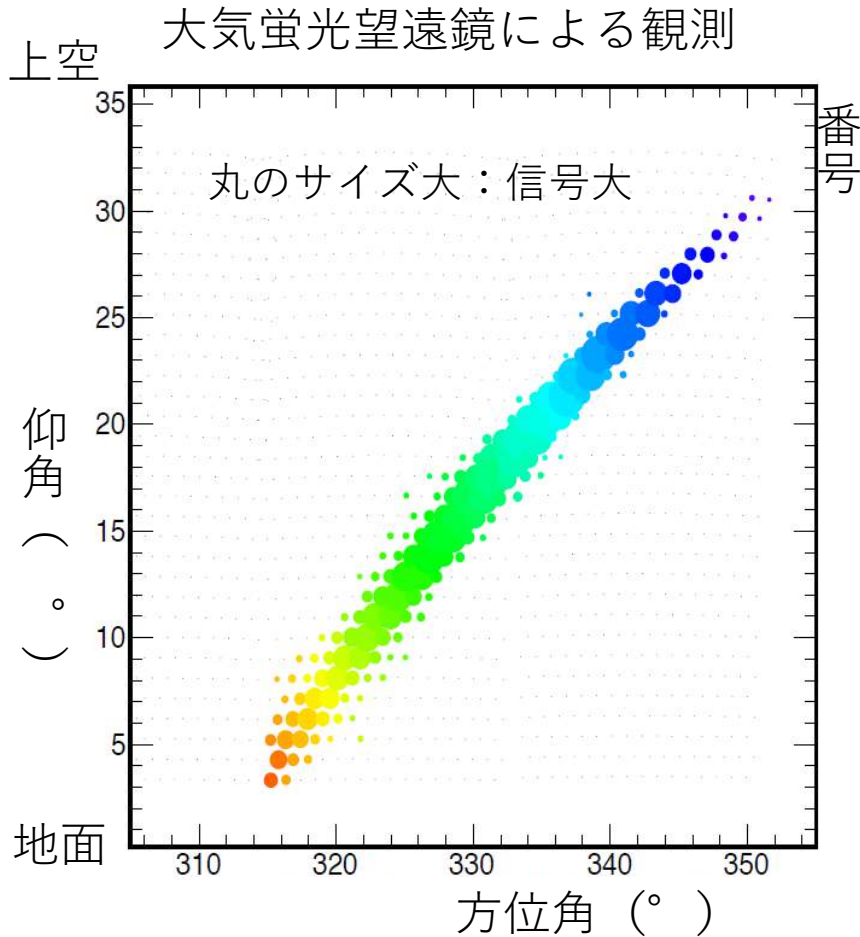
地表検出器

3平方メートル
プラスチック
シンチレータ



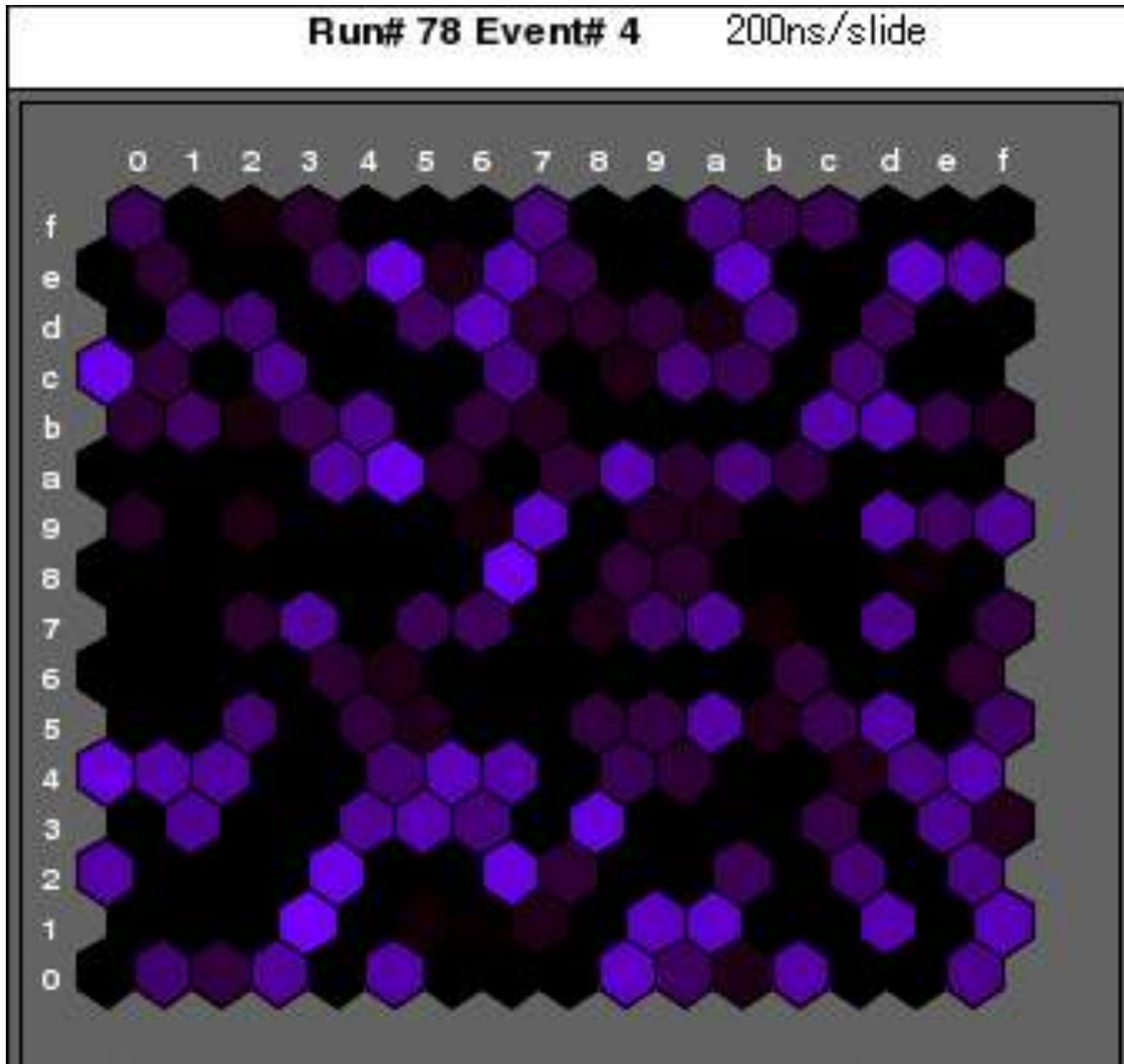
大気蛍光望遠鏡

大気蛍光望遠鏡と地表検出器による 空気シャワー同時観測例 (2008年10月26日5時51分50秒UTC)



2×10^{19} 電子ボルトの宇宙線

TA大気蛍光望遠鏡イベント例 (アニメ : 200ns=2x10⁻⁷秒/スライド)



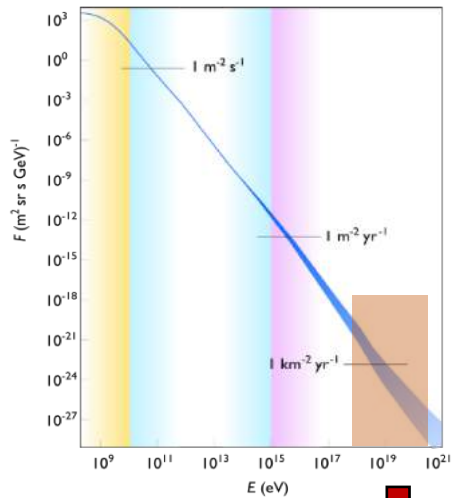
TAの重要な成果

- 最高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトル
- 最高エネルギー宇宙線の到来方向
- 最高エネルギー宇宙線の粒子種

TAの重要な成果

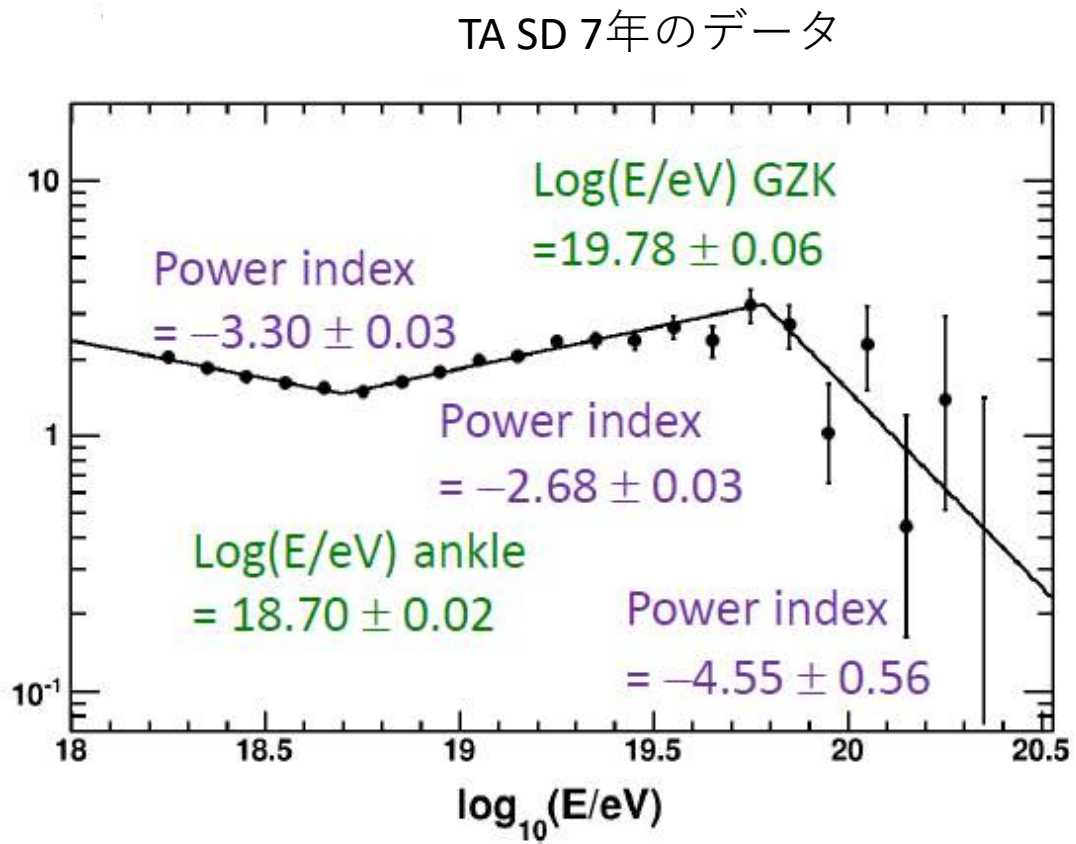
- 最高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトル
- 最高エネルギー宇宙線の到来方向
- 最高エネルギー宇宙線の粒子種

TAのエネルギースペクトル

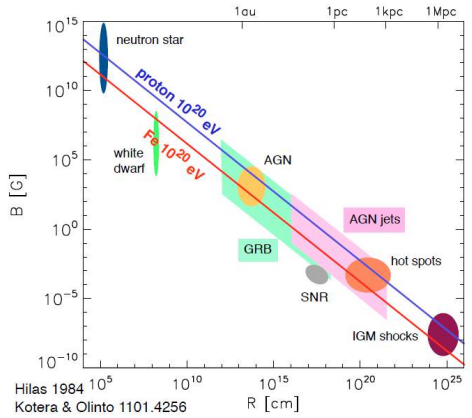


頻度JにE³をかけて
傾きの変化を強調

([頻度J (E)] × [エネルギーE]³)の対数



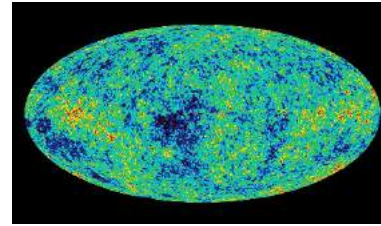
(エネルギー E) の対数



- 10²⁰eVで急激に頻度減少
- Hillas plotの予測と一致？（既知の天体での加速限界？）

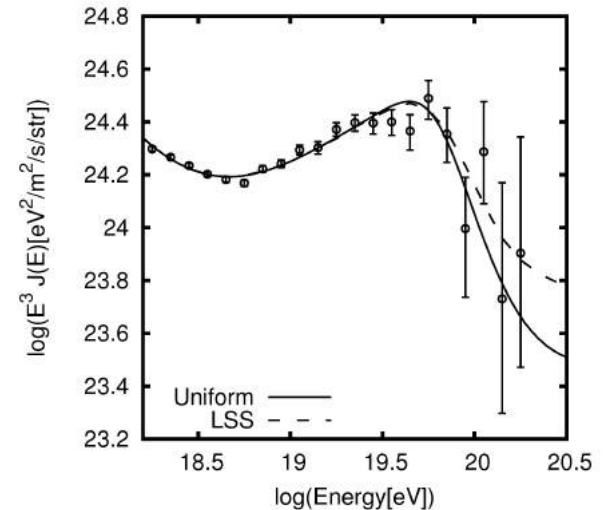
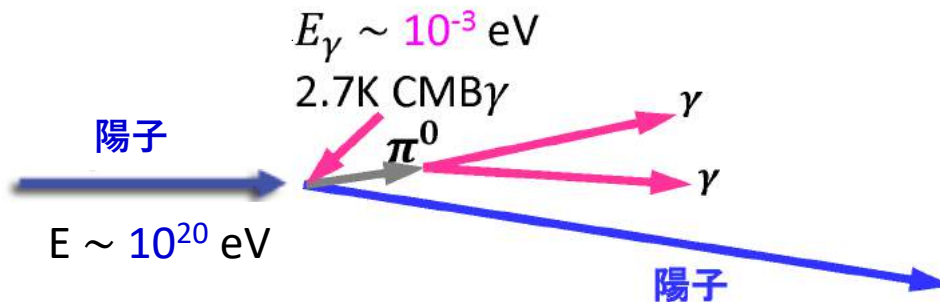
宇宙線のエネルギーに限界はあるか

- 1964年 宇宙背景放射 (CMB) の発見



この画像は後の
WMAPによる観測

- 1965年 GZK (Greisen-Zatsepin-Kuzmin) 限界の予言
 - 特殊相対性理論によると、最高エネルギー宇宙線 ($\sim 10^{20}$ eV) は CMB 光子と相互作用して 1.5 億光年程度しか伝播できず、地球に届くときには頻度が急激に減少する



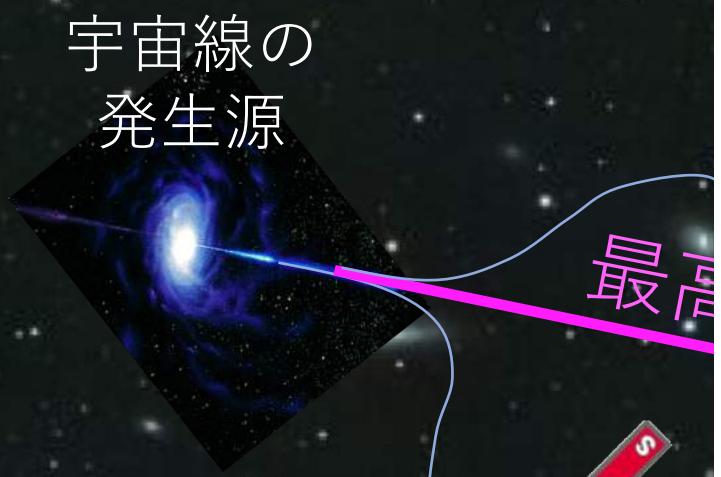
- 陽子静止エネルギーの 10^{11} 倍 (1000億のローレンツ変換)
- 2.7Kの光子が宇宙線には100MeVのガンマ線に見える
- プランクスケールに最も近い最高エネルギーでの特殊相対性理論の検証
- $>10^{20}$ eV宇宙線+GZK過程でTAの結果は説明できる

加速限界= 10^{20} eVとの判定が今後の課題

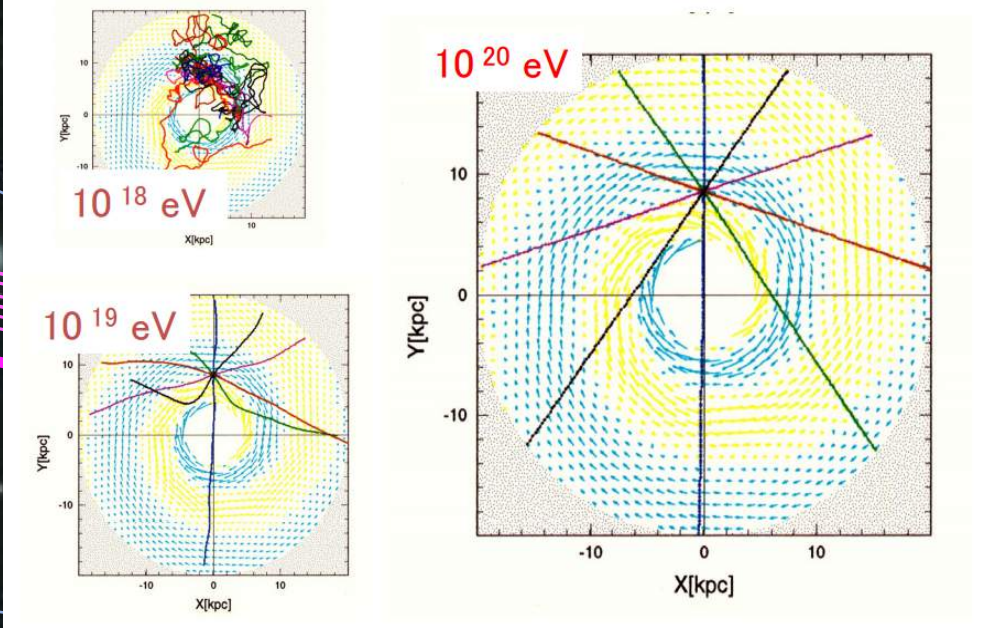
TAの重要な成果

- 最高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトル
- 最高エネルギー宇宙線の到来方向
- 最高エネルギー宇宙線の粒子種

最高エネルギー宇宙線の到来方向と発生源



銀河系の中での宇宙線陽子の運動



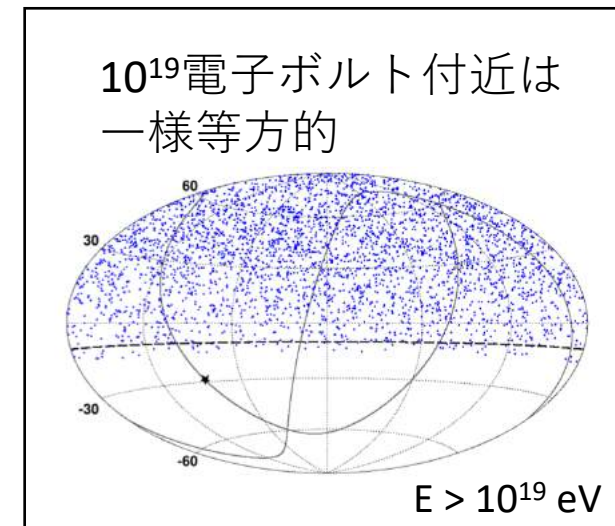
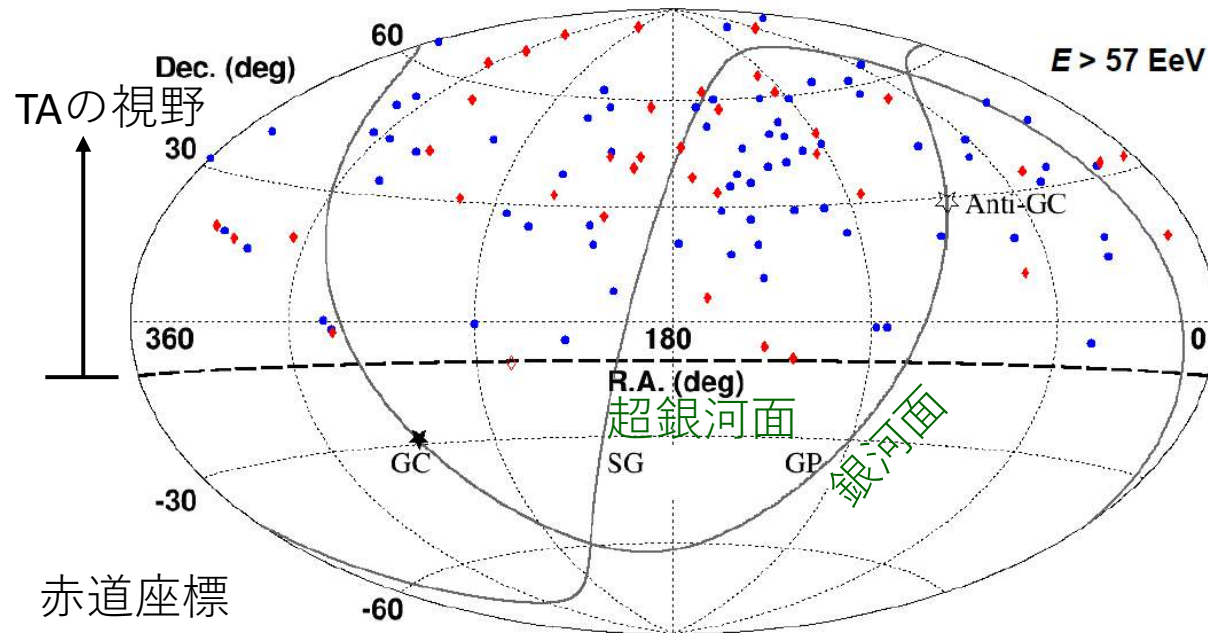
低エネルギー宇宙線：宇宙磁場に曲げられる

最高エネルギー宇宙線：ほぼ真っ直ぐ進む⇒発生源特定の期待

最高エネルギー宇宙線の 到来方向の分布

- 2008年5月～2015年5月（7年間）のデータ
- 5.7×10^{19} 電子ボルト以上: 109事象

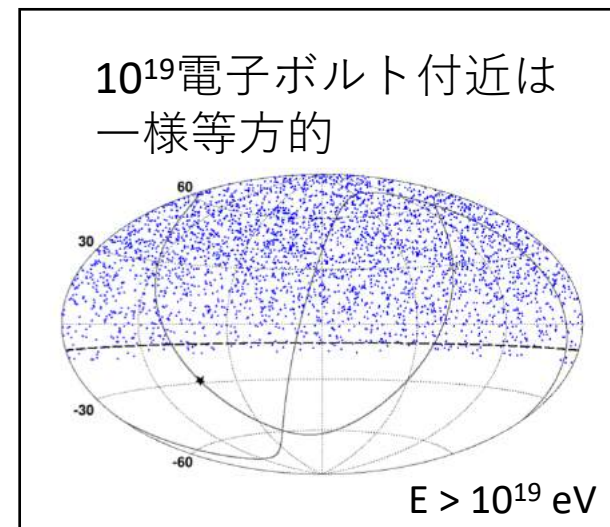
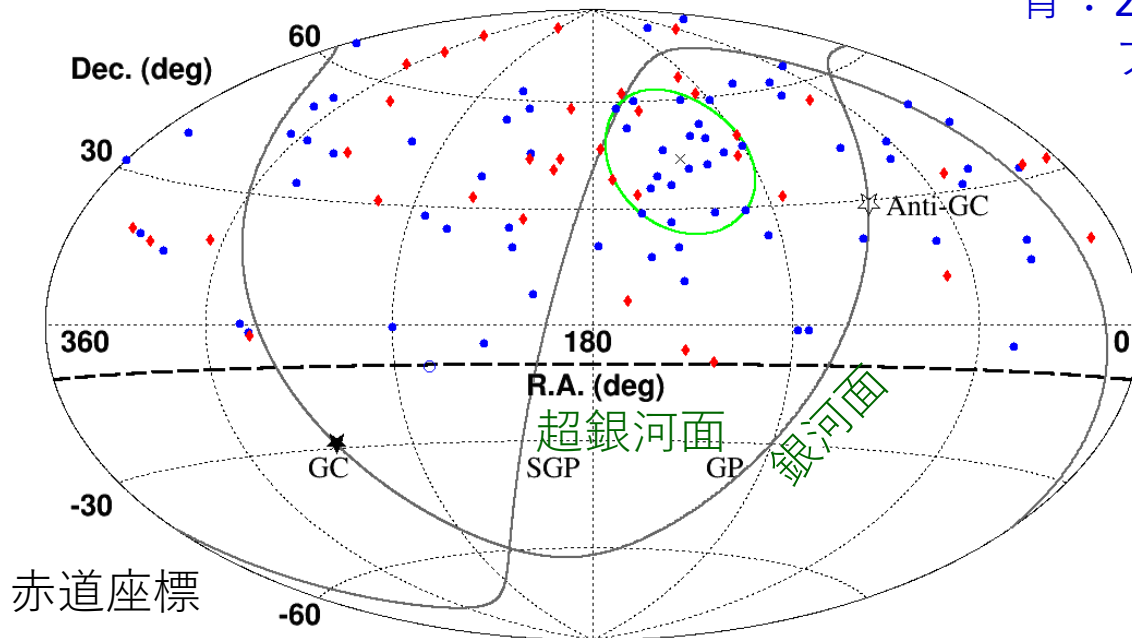
青：2014年7月
プレスリリース



最高エネルギー宇宙線の到来方向の分布

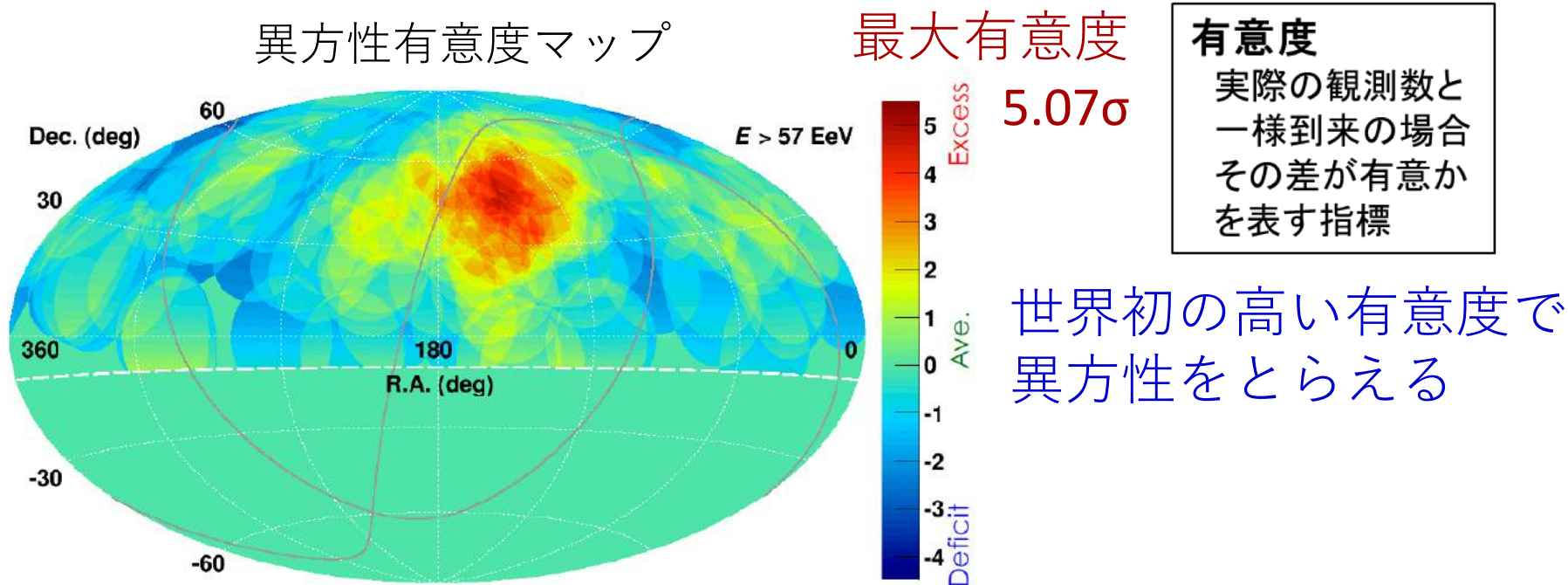
- 2008年5月～2015年5月（7年間）のデータ
- 5.7×10^{19} 電子ボルト以上: 109事象

青：2014年7月
プレスリリース



- 緑の半径20度の円内
 - 等方的到来分布の期待数：6.9 ↔ 観測数：24 (24/6.9 ~350%)

最高エネルギー宇宙線の到来方向の異方性 ホットスポット



- 最大の有意度 (5.07σ) が偶然に生じる確率は約1万分の3.7 (3.4σ)
- 以下、参考のネット情報
 - 年末ジャンボ 1等の当選確率 1,000万分の1
 - ガリガリ君あたり確率 1/25

6年間のデータ

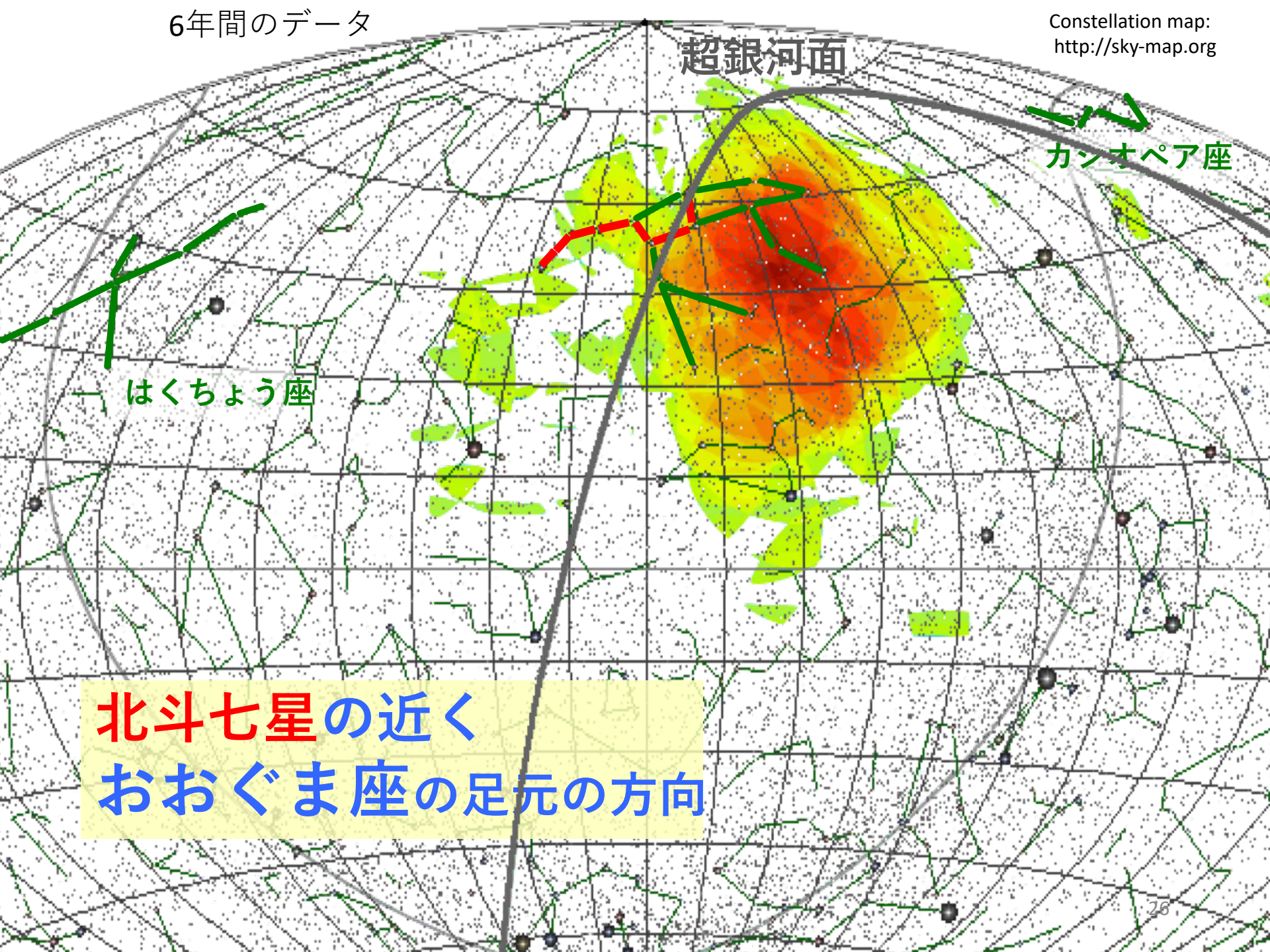
Constellation map:
<http://sky-map.org>

超銀河面

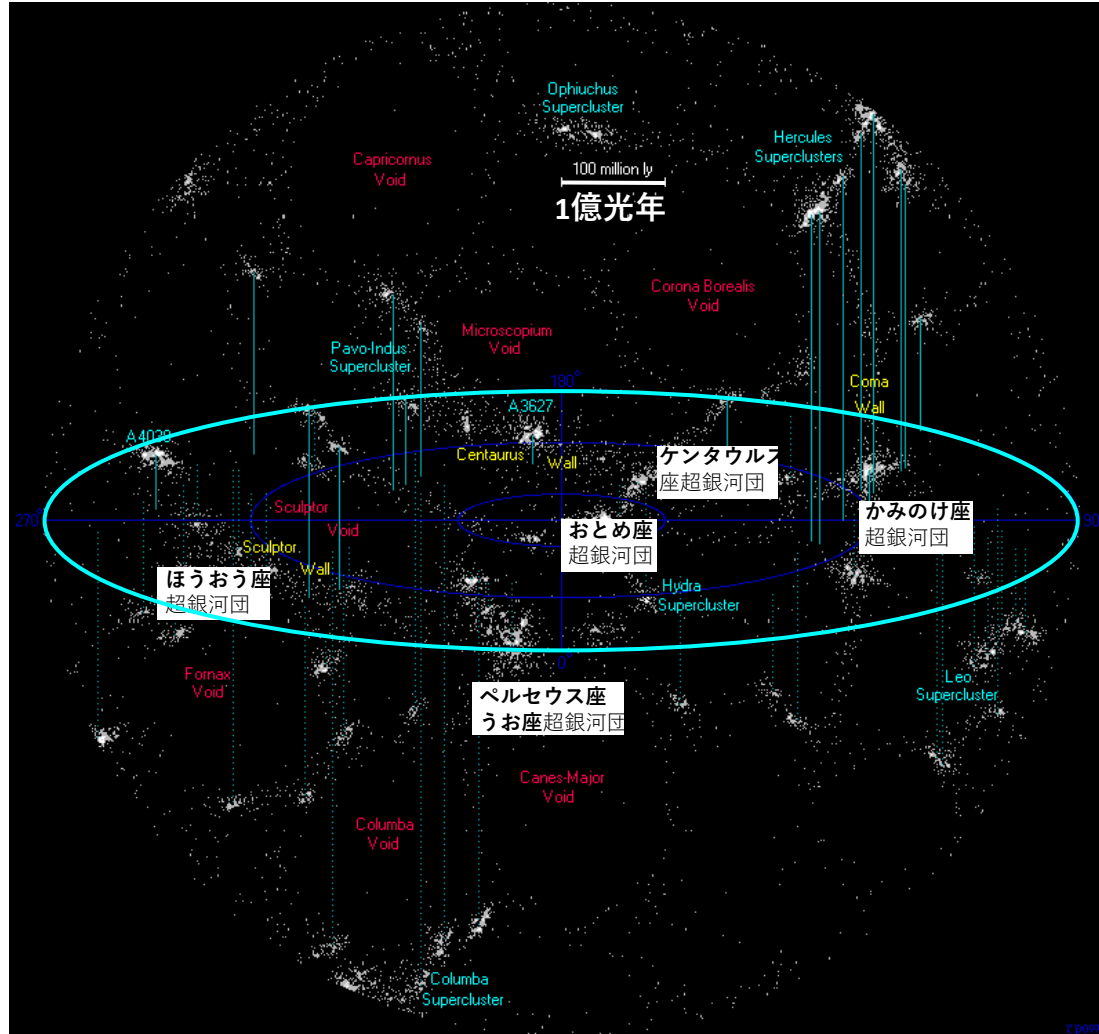
カシオペア座

はくちょう座

北斗七星の近く
おおぐま座の足元の方角



超銀河面



南北半球からの宇宙線観測

Telescope Array
Utah, USA

680 km² 地表検出器
3箇所に大気蛍光望遠鏡



Pierre Auger
Observatory
Mendoza, Argentina

3000 km² 地表検出器
4箇所に大気蛍光望遠鏡

Auger FD

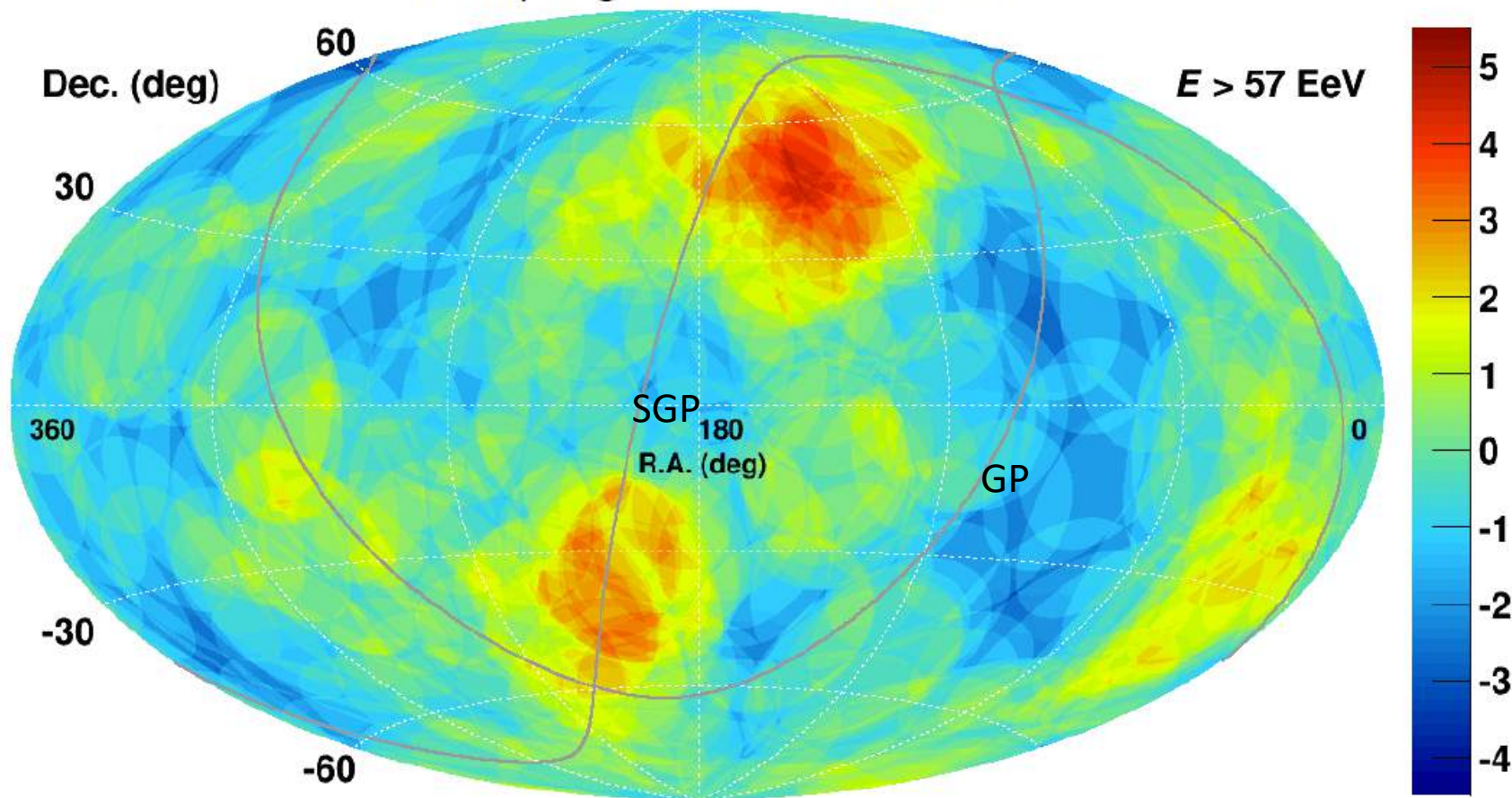


Auger SD



TAとAugerのデータを合わせた有意度マップ

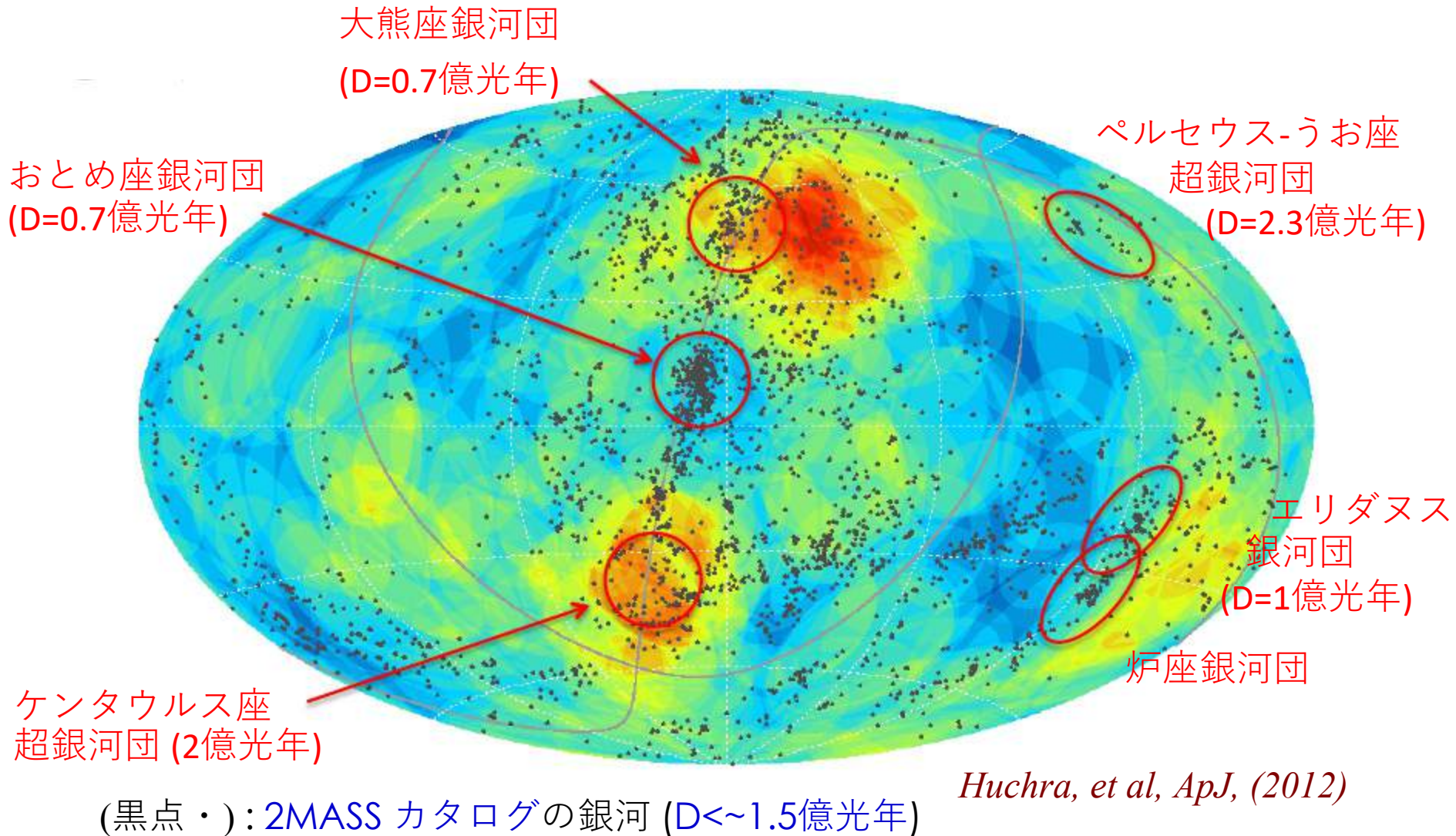
20度の半径の円の中の観測数が期待数より多いかどうかの有意度



TA (北天) 7年間 109事象：TAホットスポット 5.1σ
Auger (南天) 10年間 157事象：Auger ウォームスポット $\sim 3.6\sigma$

南米アルゼンチンにある最高エネルギー宇宙線観測所

TAとAugerの有意度マップと近傍の銀河 (団)



近傍銀河との相関はある？ない？ => TA拡張計画進行中

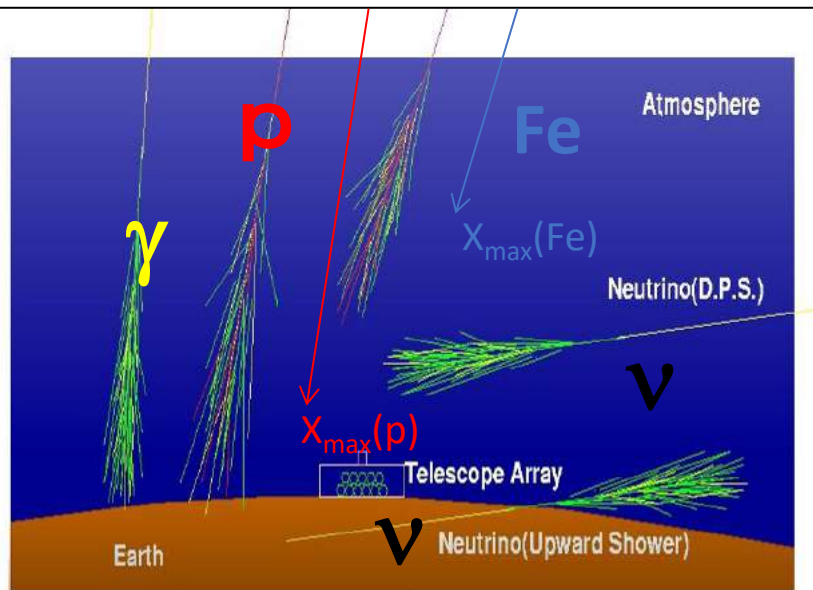
TAの重要な成果

- 最高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトル
- 最高エネルギー宇宙線の到来方向
- 最高エネルギー宇宙線の粒子種

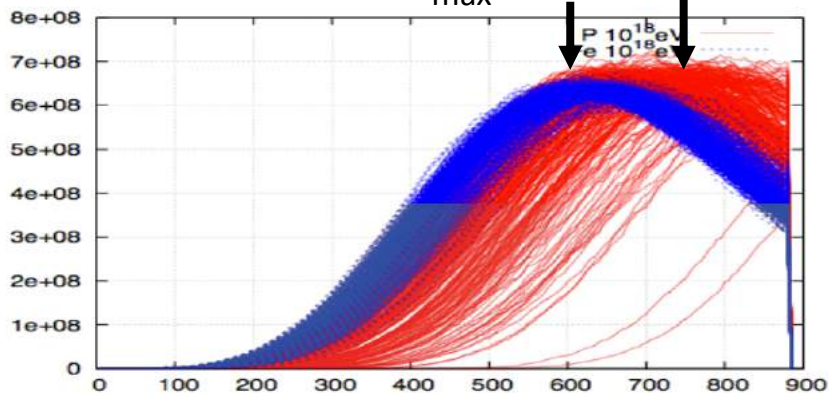
空気シャワー最大発達深さによる粒子種の同定

粒子によって大気中に突っ込む深さが違う
深い順に、ニュートリノ、ガンマ線、陽子、鉄…

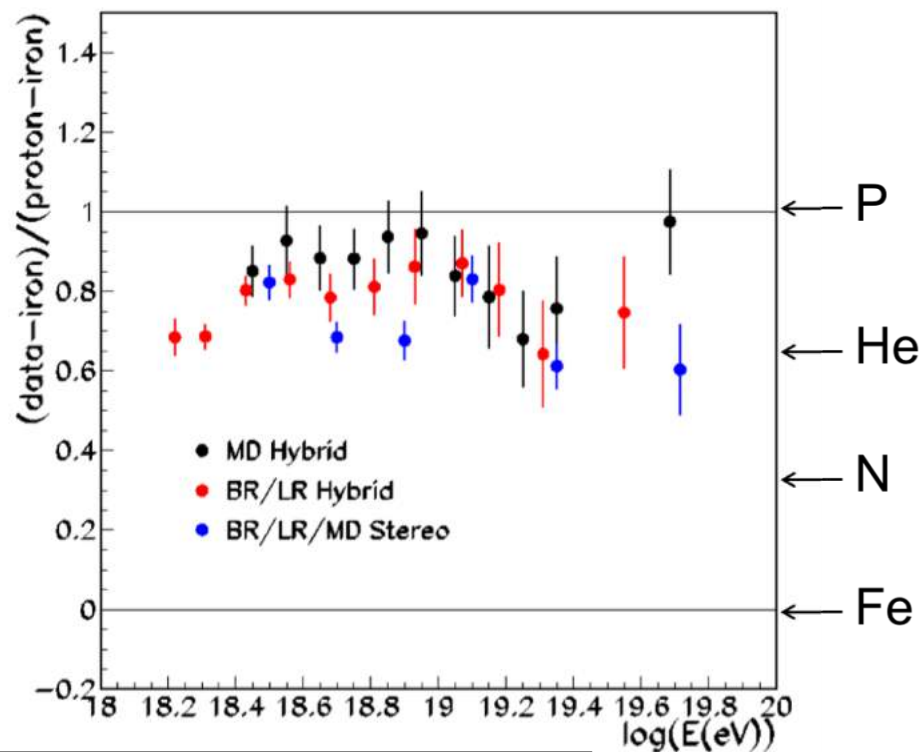
どの程度深く突っ込んだかは大気蛍光望遠鏡で観測できる



最大発達深さ X_{max} 鉄 陽子



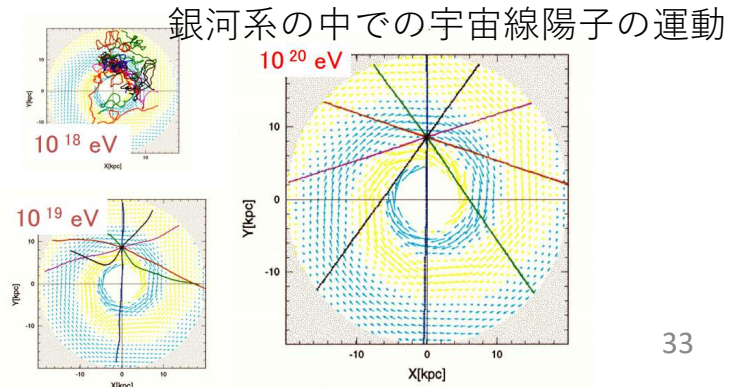
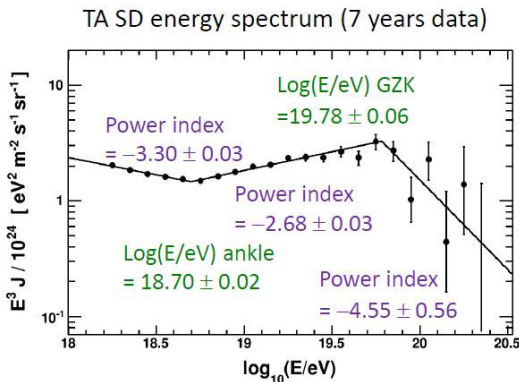
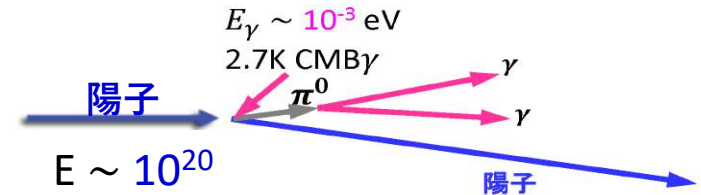
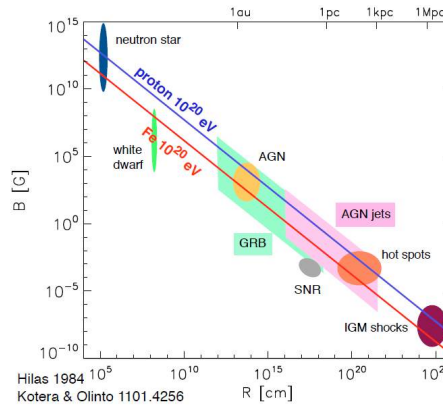
大気の深さ (g/cm^2)



陽子もしくは軽い原子核!!

なんで 10^{20} eVなんだろう？

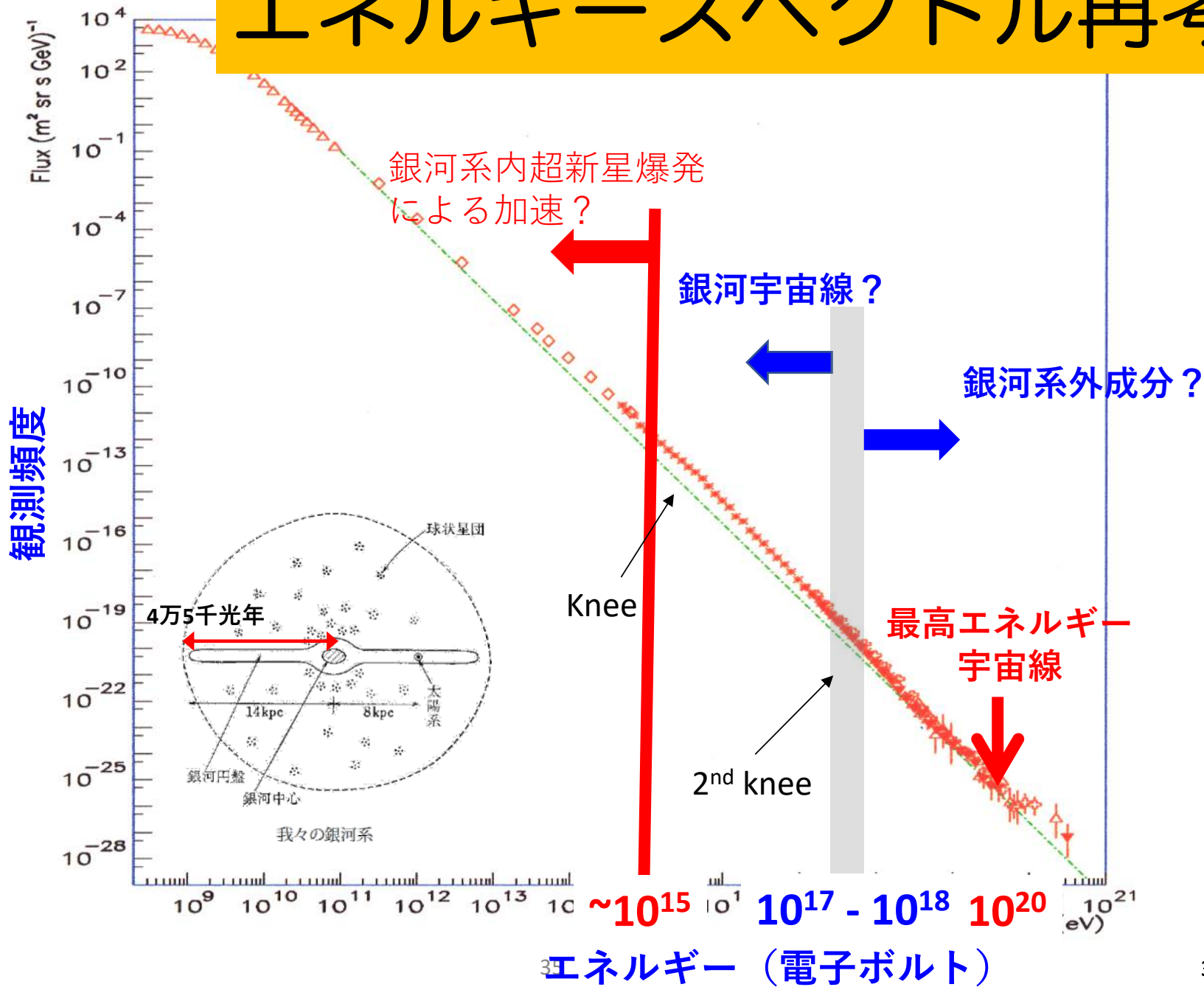
- 観測されている最高エネルギー（技術的最先端）
- 既知の天体の加速限界エネルギー(Hillas plot)
- GZK効果（CMBとの衝突）が現れるエネルギー
- 宇宙磁場内を直進できるエネルギー



TAのふたつの拡張計画

- 低エネルギーへの拡張 (TALE)
- 最高エネルギーの面積拡張 (TAx4)

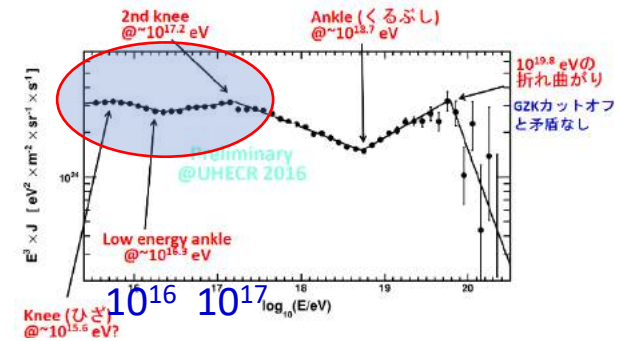
エネルギースペクトル再考



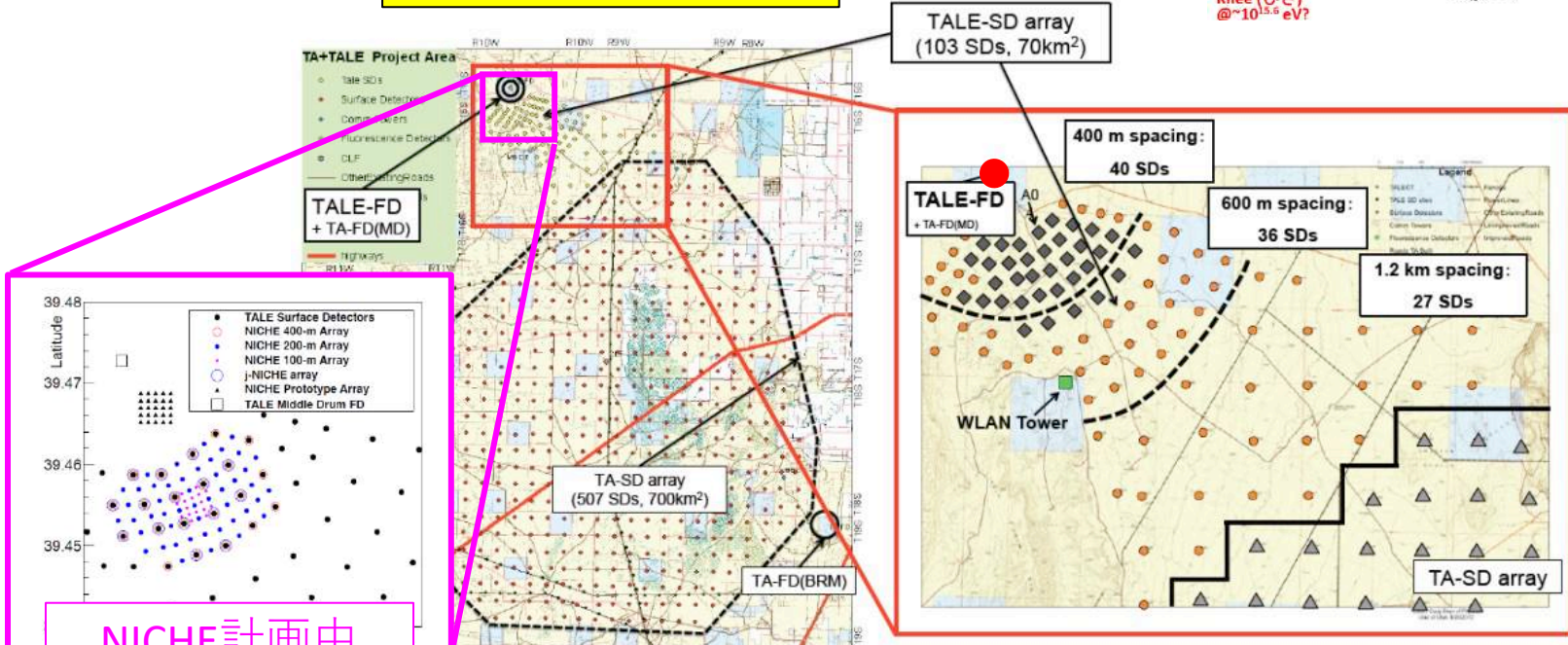
TA低エネルギー拡張 (TALE)

- 銀河系宇宙線から銀河系外宇宙線への遷移を観測
 - TALE望遠鏡(FD)：1ステーション稼働中
 - TALE地表検出器(SD)：
 - TAと同じシンチレータ検出器を約100台使用
 - 地表検出器をくわえた望遠鏡データ ⇒ 精度よく粒子同定
 - スペクトルの折れ曲がりと粒子の変化の関係を研究

TAのエネルギースペクトル (平均)



定常観測開始！！



NICHE計画中
チェレンコフ検出器

TALEとNICHEで~10¹⁵ eV以上の粒子同定を目指す

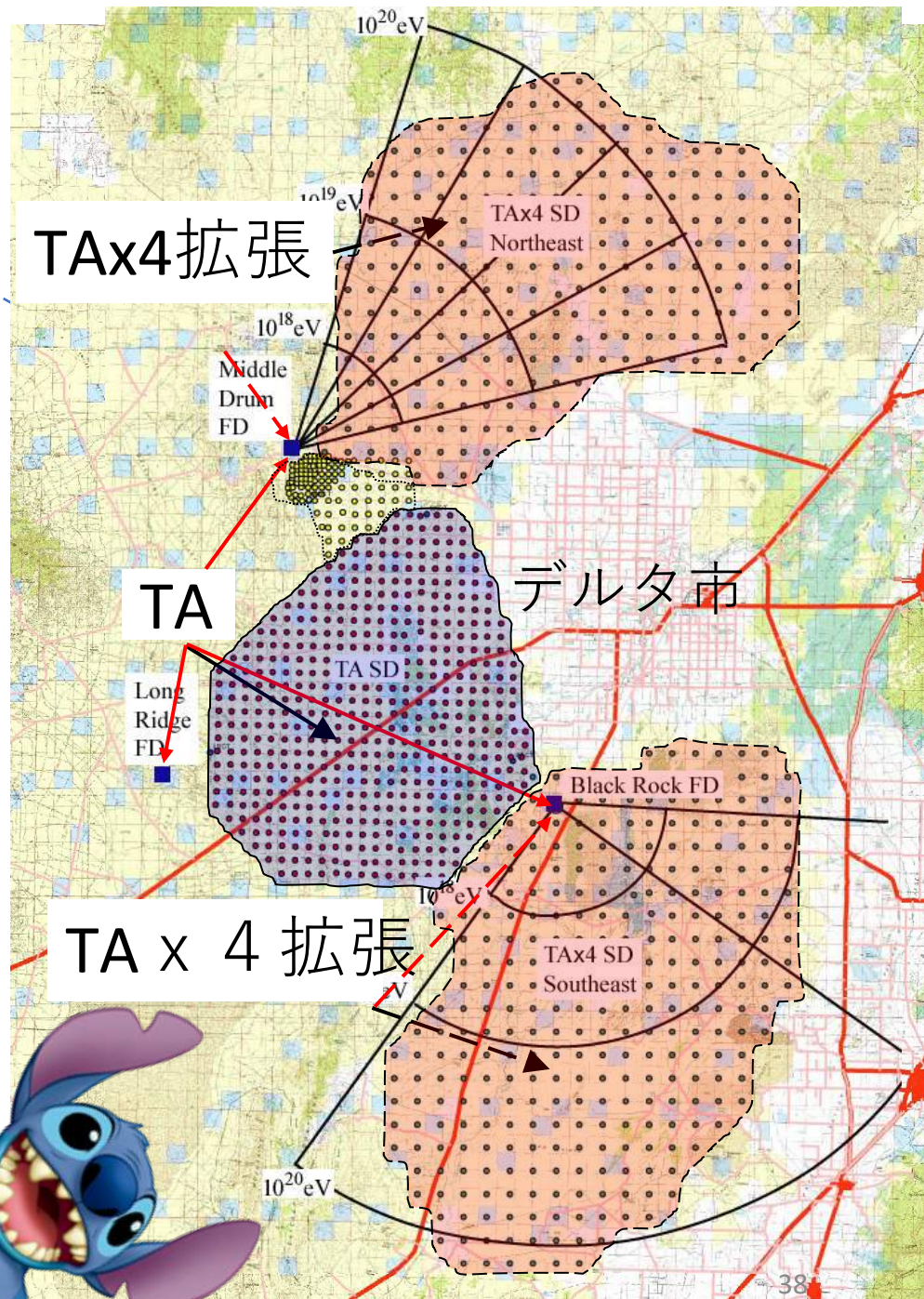
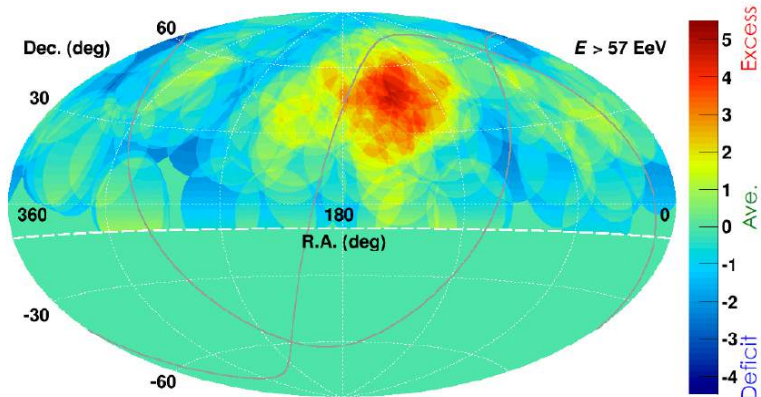
TALEサイトへの装置の設置



TA 拡張計画TAx4

TAx4: 高エネルギー拡張計画

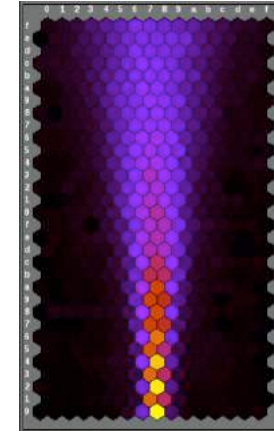
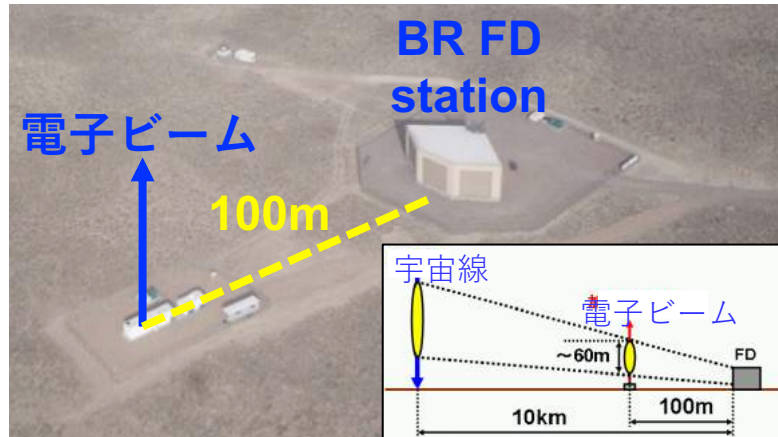
- 面積を広げる (今のTAの4倍)
- 2.08km 間隔の地表検出器
- 2018年度に設置で準備進行中
- 追加2台の望遠鏡も米国担当で建設中
- 短期間でホットスポットを検証



TAサイトでの関連研究

電子加速器と望遠鏡較正

宇宙線研が中心となり、KEK加速器グループと共同開発製作



FDで撮像されたデータのイメージ

- 40-MeV, 10^9 個の電子 (典型例) → 疑似シャワー
- End-to-end FD エネルギー較正

• 実データ

- ELS
 - 電子のエネルギーとビーム電流をモニタ
 - FDの測定値：FADC カウント

比較



• MC データ

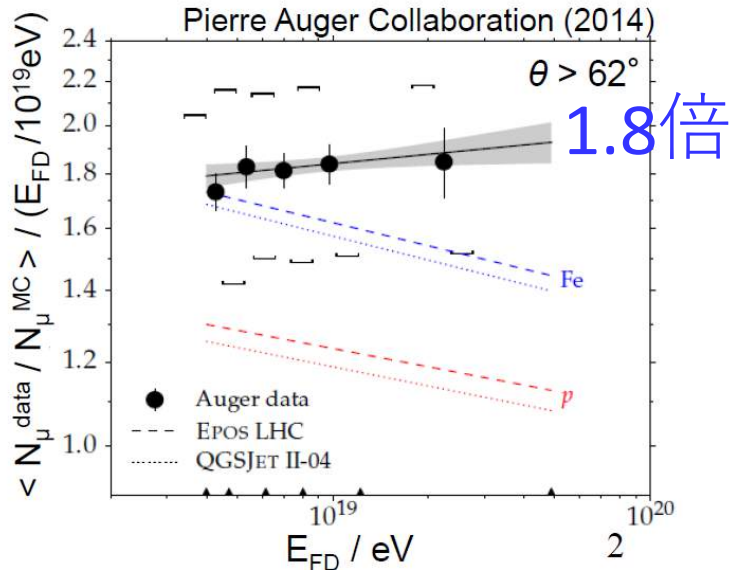
- シャワー生成
 - Geantシミュレーション
- FDシミュレーション・再構成
 - TA オフラインソフトウェア

• もう一つの利用

- 宇宙線の電波観測の開発研究

Augerの水タンク地表検出器→TAサイトへ

Augerが得た空気シャワーの**ミュオン数過剰**をTAサイトで検証



- Auger SD:水チェレンコフタンク
 - ミューオンに感度
- TA SD:シンチレータ
 - 電磁成分に感度



TAの空気シャワー事象と同期したAuger水タンクの信号取得！

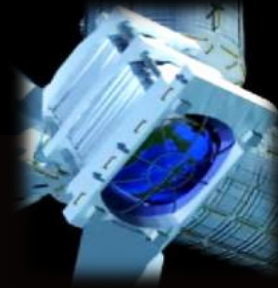
The EUSO

program

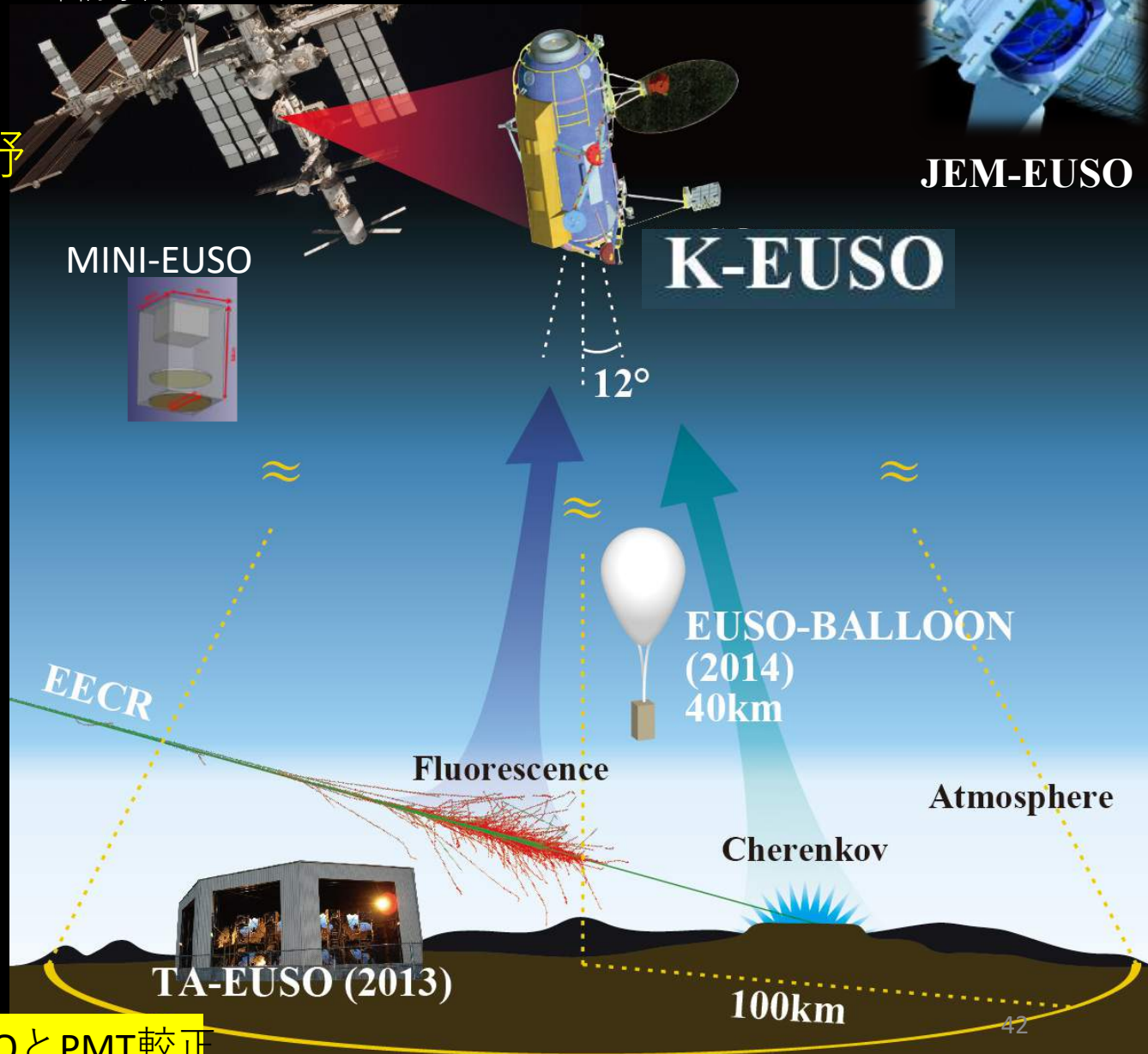
大統計(TAx4の2倍)
全天ほぼ一様な視野

最高エネルギー宇宙線大規模観測計画
- 宇宙からの望遠鏡観測 -

国際宇宙ステーション



JEM-EUSO



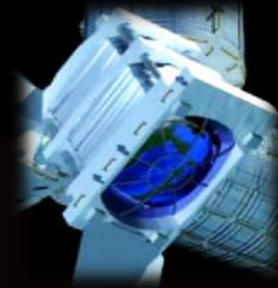
1. EUSO-TA: Ground detector at Telescope Array site: 2013-
2. EUSO-BALLOON: 1st balloon flight from Timmins, Canada (French Space Agency CNES) Aug 2014, 2017
3. MINI-EUSO (2017)
4. K-EUSO (2019)
5. JEM-EUSO (>2020+)

宇宙線研も参加：TA-EUSOとPMT校正

The EUSO

最高エネルギー宇宙線大規模観測計画
- 宇宙からの望遠鏡観測 -

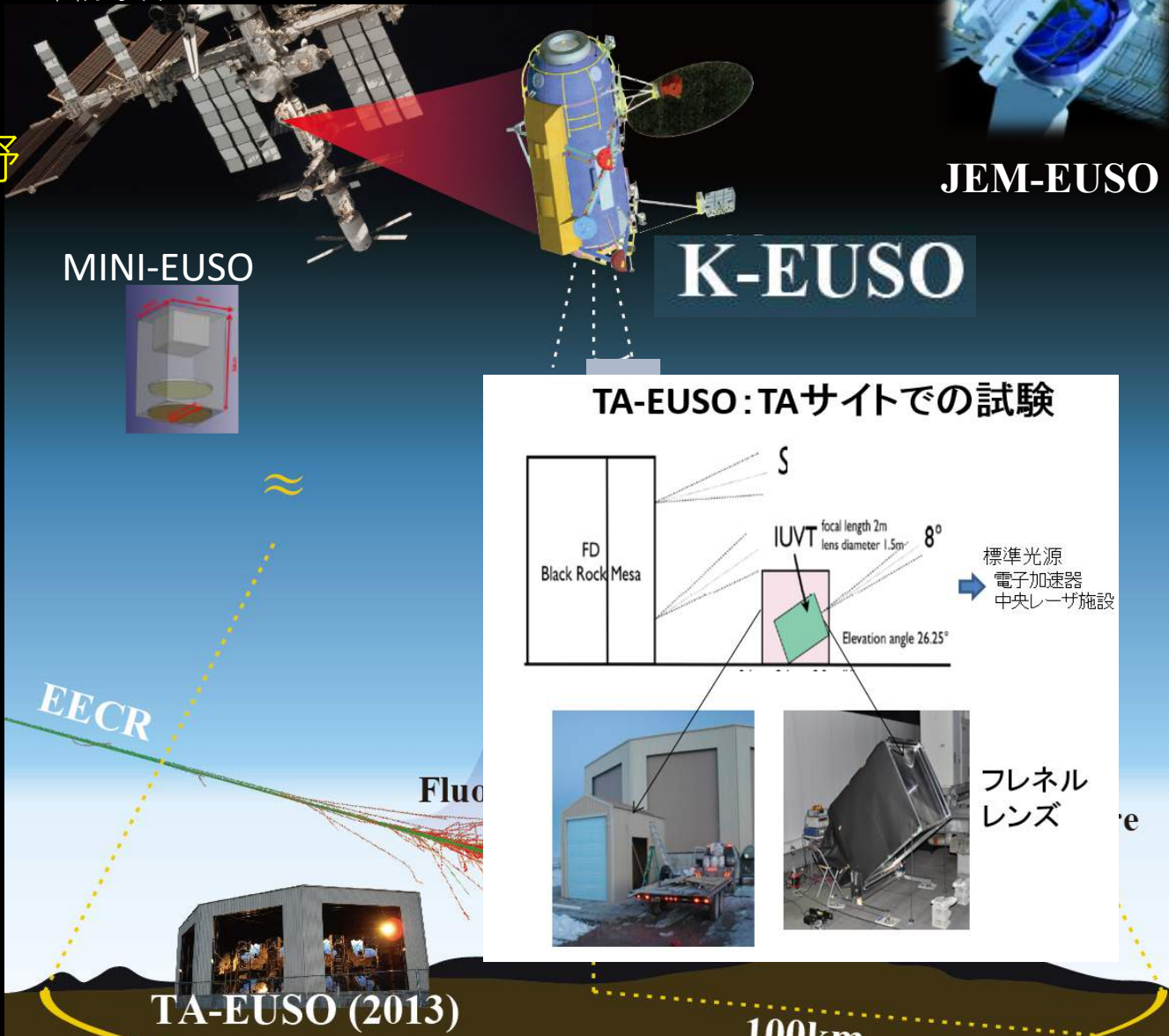
国際宇宙ステーション



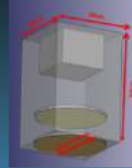
JEM-EUSO

program

大統計(TAx4の2倍)
全天ほぼ一様な視野

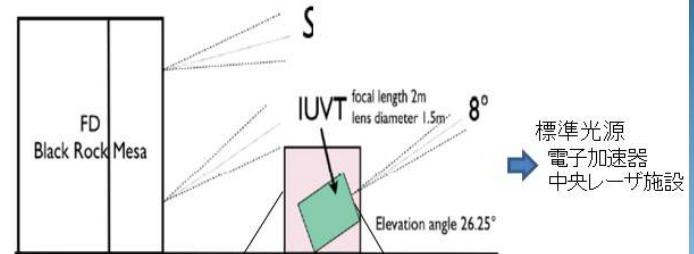


MINI-EUSO



K-EUSO

TA-EUSO: TAサイトでの試験



フレネル
レンズ

TA-EUSO (2013)

100km

宇宙線研も参加：TA-EUSOとPMT較正

The EUSO

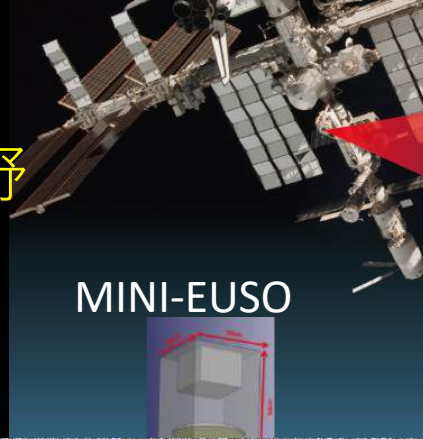
最高エネルギー宇宙線大規模観測計画
- 宇宙からの望遠鏡観測 -

program

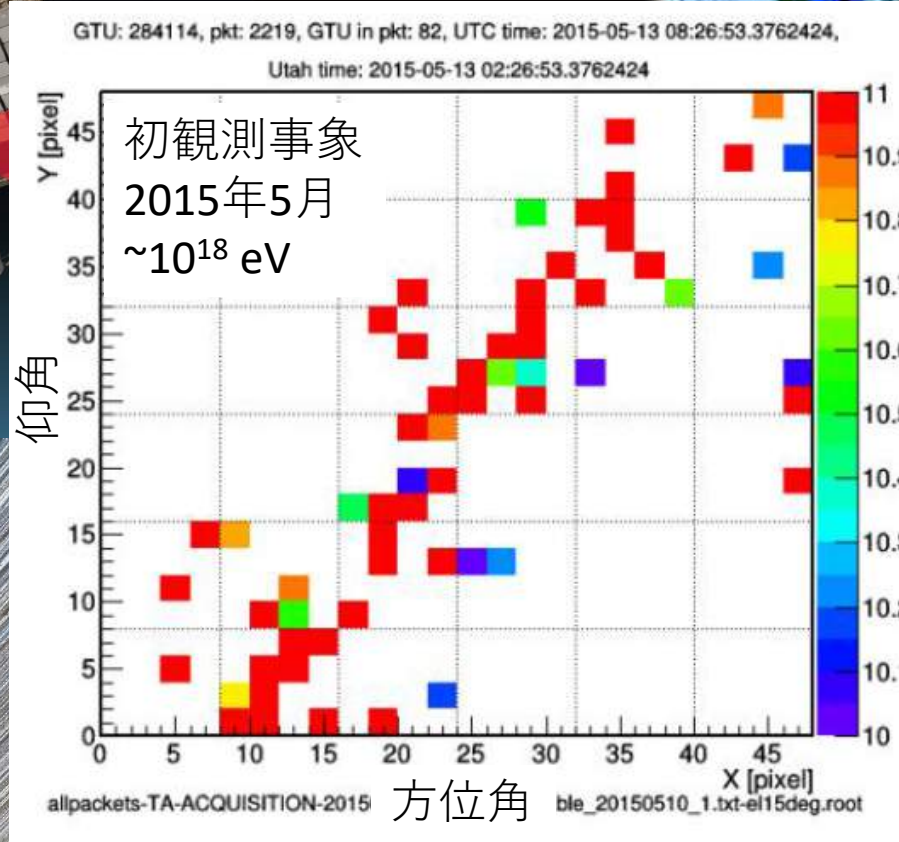
大統計(TAx4の2倍)
全天ほぼ一様な視野

1. EUSO-TA: Ground
detector at Telescope
Array site: 2013-

国際宇宙ステーション



MINI-EUSO



フレネル
レンズ

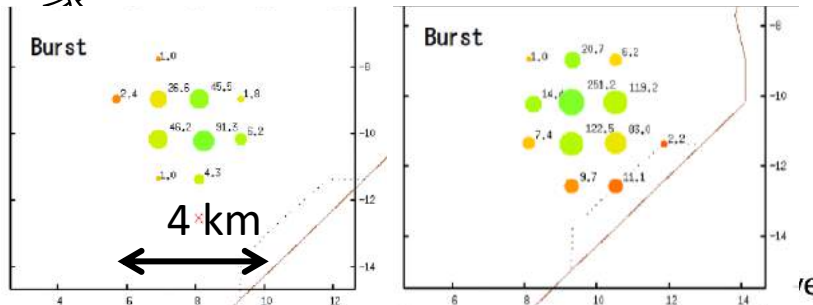
100km

宇宙線研も参加：TA-EUSOとPMT校正

雷と同期したTAバースト事象の発見

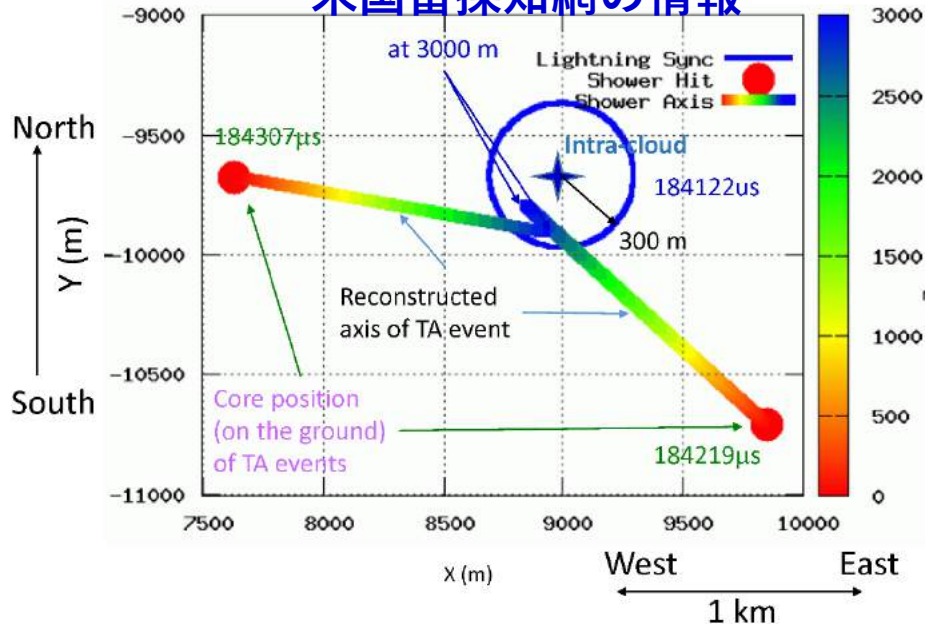
- 1ミリ秒に3以上のシャワートリガー現象が5年間に10例
 - 通常の100万倍多い
- 雷と同期した地表検出器事象

- LMA: Lightning Mapping Array
 - VHF受信機アレイ
 - ニューメキシコ工科大学(NMT)で開発：雷の三次元再構成



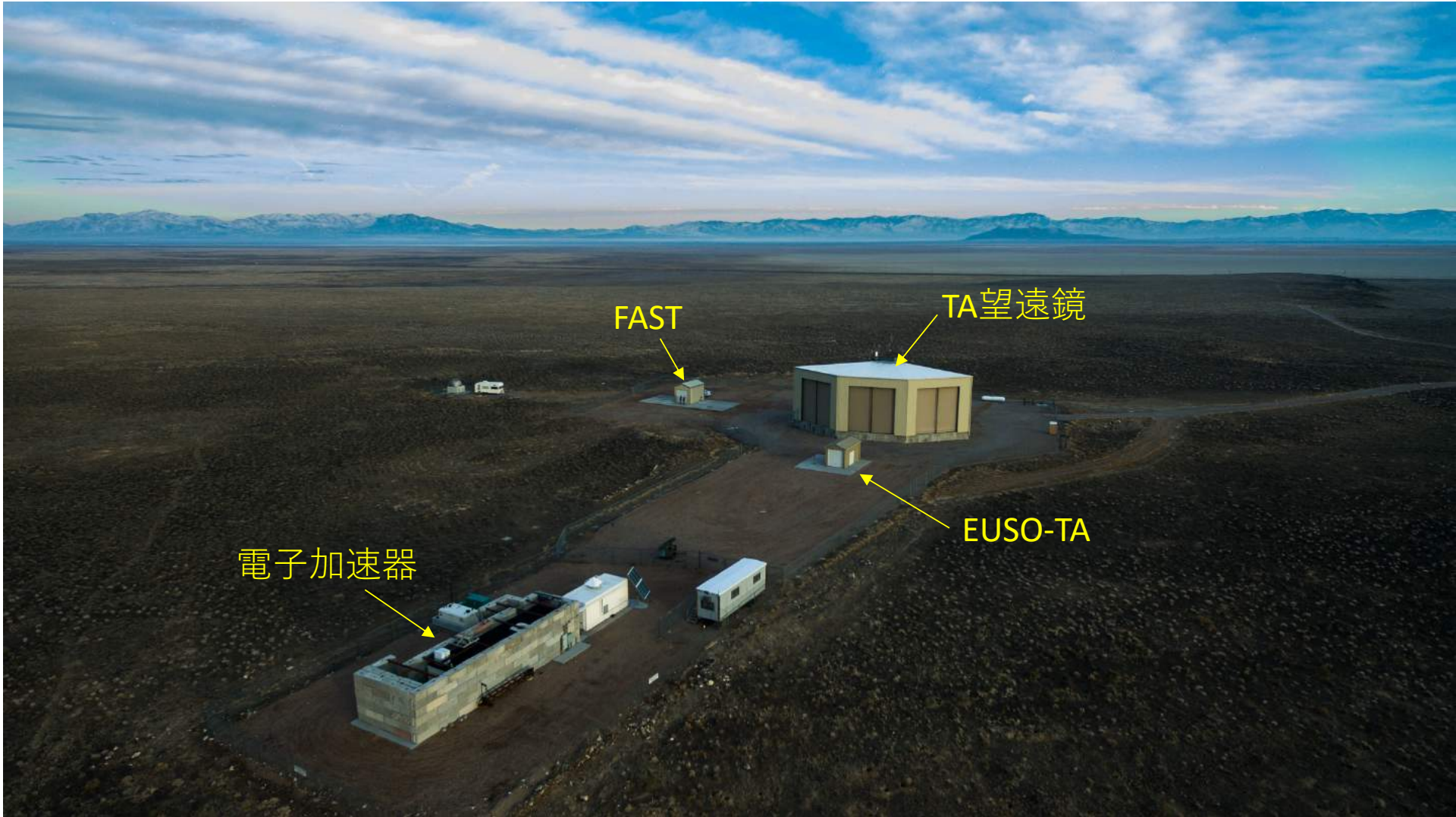
米国雷探知網の情報

地表からの高さ



- この発見を受けて、移設したLMAのひとつ
(R. Thomas, NMT@Long Ridge)
- 現在：別の雷検出器も設置

望遠鏡サイト





私のTA体験

まとめ

宇宙線のエネルギーと頻度

